

УДК 520.85 + 520.6.04; 528.835; 551.510

№ держ. реєстрації 0118U004068
інв. №

Національна академія наук України
Головна астрономічна обсерваторія НАН України
03143, м. Київ, Заболотного, 27, тел: 526-31-10

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Головної астрономічної обсерваторії НАН
України



академік НАН України

Я.С. Яцків

2018 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО – ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Розробка програмно-апаратного комплексу для калібрування інструментів,
збору та обробки даних космічної місії Аерозоль-UA»

Етап 1 "Розробка та відлагодження алгоритмів лабораторного та орбітального
калібрування та алгоритмів обробки даних з поляриметрів експерименту
Аерозоль-UA"
(проміжний)

Керівник НДР
д.ф.-м.н., с.н.с.

Г. П. Міліневський

Зав. відділу атмосферної
оптики та приладобудування
канд. техн. наук

І. І. Синявський

Розглянуто та прийнято Вченою радою ГАО НАН України,
протокол № 18 від "13" грудня 2018 р.

2018

СПИСОК АВТОРІВ

Зав. відділу к.т.н



І.І. Синявський

Г.н.с. д. ф.-м. н.,
науковий керівник

Г.П. Міліневський

Пр.н.с., к.т.н



М.Г. Сосонкін

С.н.с., к. ф.-м. н.



В.О. Данилевський

С.н.с., к. ф.-м. н.



Є.А.Оберемок

С.н.с., к. ф.-м. н.



І.С. Коломієць

Н.с., к. ф.-м. н.



А.П. Бовчалюк

Пров. інж.



Н.О. Єременко

Інж.



Ю.Ю. Юхимчук

Асп.



І.В. Фесянов

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 68 с., 15 рис., 2 табл., 3 дод., 14 джерел.

КОСМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, АТМОСФЕРА, АЕРОЗОЛЬ, ПОЛЯРИМЕТРІЯ, КАЛІБРУВАННЯ, МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРІВ, ОБРОБКА ДАНИХ

Об'єкт дослідження: аерозолі в атмосфері Землі. Мета роботи: розробка моделі калібрування бортових інструментів проекту Аерозоль-UA, розробка та створення алгоритму та програмного забезпечення опрацювання даних зі скануючого поляриметра СканПол та мультиспектрального іміджера-поляриметра МСП. Методи дослідження: комп'ютерне моделювання, програмування та створення алгоритмів обробки даних, розробка методик калібрування.

Розроблено концепцію та структуру алгоритму обробки даних для багатоканального скануючого поляриметра ScanPol космічного проекту Aerosol-UA. Метою місії є моніторинг просторово-часового розподілу характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів в атмосфері Землі. У роботі запропоновано програмну архітектуру для орбітального калібрування та її реалізацію, програмне рішення обрахунку сонячних зенітних кутів для ділянок спостереження, а також методику географічної прив'язки супутникових спостережень.

Деталізовано модель поляриметричних каналів і розроблено методику визначення калібрувальних констант з математичної моделі поляриметрів СканПол та МСП. Оцінено паразитні сигнали, пов'язані з розсіянням світла на неоднорідностях оптичних елементів поляриметрів. В чисельних експериментах визначено граничні похибки вимірювань ступеня поляризації при реєстрації з поляриметрами СканПол та МСП. Результати роботи представлено у вигляді тексту статті, надісланої до журналу *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*.

Роботи за договором є продовженням підготовки космічної місії Аерозоль-UA, розпочатої у 2013 році за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1 МАТРИЧНИЙ ФОРМАЛІЗМ ДЛЯ ОПИСУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ	7
1.1 Матриці та вектор Джонса	7
1.2 Матриця Мюллера. Вектор Стокса	8
2 КОСМІЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ АЕРОЗОЛЬ-UA: ЗАГАЛЬНИЙ СТАН	11
2.1 Скануючий поляриметр ScanPol	11
2.2 Мультиспектральний іміджер-поляриметр MSIP	13
2.3 Модифікація інструментів ScanPol та MSIP для використання на платформі Yuzhsat	16
2.4 Алгоритм GRASP для відтворення характеристик аерозолію	17
3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОЛЯРИМЕТРА СКАНПОЛ	22
3.1 Опис завдання створення алгоритму обробки	22
3.2 Калібрування	25
3.3 Розбиття на пікселі	28
3.4 Розрахунок сонячних кутів	29
3.5 Завершальні етапи обробки	30
ВИСНОВКИ	32
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	33
Додаток А. МОДЕЛЮВАННЯ КАЛІБРУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ КОСМІЧНОЇ МІСІЇ АЕРОЗОЛЬ-UA	36
Додаток Б. КОД ПРОГРАМИ КАЛІБРУВАЛЬНОГО МОДУЛЯ	64
Додаток В. ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ДОГОВОРОМ	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

AERONET	– AErosol RObotic NETwork (автоматична мережа сонячних фотометрів досліджень аерозолію)
AOT	– Aerosol Optical Thickness (Аерозольна оптична товщина)
APS	– Aerosol Polarimeter Sensor
IFOV	– Instant Field of View
GRASP	– Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties
VIS-1, -2	– Канали поляриметра у візуальній області спектра
SWIR-1, -2;	– Канали поляриметра у ближній інфрачервоній області
IR-1, -2	спектра
ІЧ, IR	– Інфрачервоний
DoAP	– division-of aperture polarimetry
СканПол	– Скануючий поляриметр
УФ	– Ультрафіолетовий
КД	– Конструкторська документація
КНА	– Контрольно-налагоджувальна апаратура
КПА	– Контрольно-перевірочна апаратура
КНУ	– Київський національний університет імені Тараса Шевченка
МСП	– Мультиспектральний іміджер-поляриметр
ДЗЗ	– Дистанційне зондування Землі
SFSIP	– Snapshot full-Stokes imaging polarimetry

ВСТУП

Вплив аерозольних частинок, зважених в земній атмосфері, на клімат за багатьма оцінками можна порівняти за величиною з ефектом парникових газів. Разом з тим аерозолі є найменш вивченим компонентом атмосфери, в результаті чого існує невизначеність в оцінці впливу аерозолів на радіаційний баланс планети. Більше того, інформація про глобальний розподіл антропогенних аерозолів практично відсутня, що вкрай ускладнює поліпшення моделей переносу аерозолів в атмосфері та кількісний опис антропогенного впливу на клімат та на довкілля.

Космічний експеримент Аерозоль-UA має на меті розробку двох інструментів: скануючого поляриметра СканПол та мультиспектрального іміджера-поляриметра МСІП, за допомогою яких буде можливо створити базу даних, яка ґрунтується на регулярних вимірюваннях з супутника оптичних характеристик аерозольних і хмарних частинок в атмосфері протягом тривалого проміжку часу. Дані з приладів СканПол та МСІП необхідні для визначення часового та просторового розподілу кількості, фізичних характеристик та хімічного складу тропосферних і стратосферних аерозолів у земній атмосфері та оцінки їхнього впливу на погоду, клімат і ступінь забруднення навколишнього середовища.

Робота присвячена розробці алгоритму обробки даних спостереження для одного з основних інструментів проекту – скануючого поляриметра СканПол. Він призначений для визначення з високою точністю параметрів Стокса у спектральних каналах від ближньої ультрафіолетової до короткохвильової інфрачервоної області в широкому діапазоні фазових кутів з фотометричною точністю 4% та поляриметричною точністю краще 0.2%. У роботі вперше зроблено детальний опис кожного етапу обробки інформації, запропоновані найбільш релевантні рішення розв'язку кожної з підзадач. Також робота в себе включає програмну реалізацію поляриметричного та фотометричного калібрування даних, яке безпосередньо входить в розроблений алгоритм.

Розробка та відпрацювання блок-схеми тракту комп'ютерної обробки сигналу поляриметрів СканПол та МСІП, а також моделей калібрування цих є головними темами даного етапу проекту Аерозоль-UA. Вони є продовженням підготовки космічної місії Аерозоль-UA, розпочатої у 2013 році за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень.

1 МАТРИЧНИЙ ФОРМАЛІЗМ ДЛЯ ОПИСУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ

1.1 Матриці та вектор Джонса

Для опису поляризаційних ефектів у багатокомпонентних системах зручно використовувати матриці Джонса, що дають змогу компактно записувати проходження через них світла [1]. Тут стан поляризації світла описують вектором, а систему, що змінює цей стан, - матрицею. Якщо, наприклад, у систему входить світло описане вектором $\vec{A}$, а система описана матрицею $\vec{M}$, то вектор $\vec{A'}$, який описує світло, що вийшло з системи, отримуємо перемноживши $\vec{M}$ та $\vec{A}$:

$$\vec{A'} = \vec{M} * \vec{A} \quad (1.1)$$

Якщо система багатокомпонентна, то відповідний результат знаходимо простим перемноженням матриць, що відповідають окремим її елементам:

$$\vec{A'} = \vec{M}_n \vec{M}_{n-1} \vec{M}_{n-2} \dots \vec{M}_1 \vec{A} = \vec{M} \vec{A} \quad (1.2)$$

Перемножують матриці за ходом променя, так що відразу зрозуміло, що результат залежить від послідовності розміщення елементів системи.

Цей метод придатний до повністю поляризованого світла і не придатний при його частковій поляризації. Якщо ж світло поляризоване частково, використовують чотиривимірний вектор Стокса і матриці Мюллера. Конкретизуємо розглядуваний метод. Вектор $\vec{A}$ має компоненти, які збігаються з X та Y -компонентами електричного вектора світлової хвилі у вибраній прямокутній системі координат:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$\text{де } E_x = E_{0x} e^{i\delta_x}; E_y = E_{0y} e^{i\delta_y}$$

Виражаючи компоненти електричного вектора світлової хвилі на виході через його компоненти на вході системи:

$$\begin{cases} E_x^1 = aE_x + bE_y, \\ E_y^1 = cE_x + dE_y, \end{cases} \quad (1.4)$$

Отримаємо співвідношення:

$$\begin{pmatrix} E_x^1 \\ E_y^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

або

$$\vec{A'} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \vec{A} = \vec{M} * \vec{A} \quad (1.6)$$

яке свідчить, що елементи Матриці Джонса збігаються з коефіцієнтами лінійного перетворення (1.4).

1.2 Матриця Мюллера. Вектор Стокса

За допомогою вектора Стокса можна описати світло, поляризоване повністю або частково. Ці нові можливості виникають за рахунок того, що вектор Стокса чотиривимірний (вектор Джонса - двовимірний), а відповідні матриці Мюллера мають 4*4. Матриці Джонса розраховують, коефіцієнти матриць Мюллера вимірюють. Якщо відомі матриці Мюллера окремих компонент поляризаційної системи, її вплив на падаючий пучок світла розраховують шляхом перемноження матриць у порядку, що відповідає розміщенню елементів досліджуваної системи [1].

Якщо A та B – амплітуди x - та y -компонент електричного вектора, а $\delta = \delta_x - \delta_y$ – зсув фаз між ними, то параметри Стокса S_i вивчають так

$$\begin{cases} S_0 = \langle A^2 + B^2 \rangle, \\ S_1 = \langle A^2 - B^2 \rangle, \\ S_2 = \langle 2AB \cos \delta \rangle, \\ S_3 = \langle 2AB \sin \delta \rangle. \end{cases} \quad (1.7)$$

Вони пов'язані між собою очевидним співвідношенням

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (1.8)$$

Дужки у (1.7) визначають усереднення за проміжком часу, необхідного для реєстрації світла. Параметри S_i є компонентами 4-вектора Стокса $\vec{S}$:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (1.9)$$

Якщо пронормувати (1.8) на S_0 , то співвідношення (1.7) можна записати як

$$\begin{cases} S_0 = 1, \\ S_1 = x = \cos 2\gamma \cos 2\chi, \\ S_2 = y = \cos 2\gamma \sin 2\chi, \\ S_3 = z = -\sin 2\gamma, \end{cases} \quad (1.10)$$

що дає змогу визначити декартові координати певної точки на сфері одиничного радіуса (відомий у цьому плані як сфера Пуанкаре). Фізичний зміст цих параметрів можна зрозуміти з таких міркувань. З рівняння (1.7) очевидно, що параметр S_0 пропорційний до інтенсивності світла; S_1 – зростає з ростом x -компоненти (A) та із зменшенням y -компоненти (B) поля і на цій основі є компонентою з переважаючою “горизонтально” поляризацією. При чисто горизонтальній поляризації $S_1 = S_0$, при чисто вертикальній лінійній поляризації $S_1 = -S_0$. Параметр S_2 досягає максимуму при $\delta = 0$ та $A = B$ і є параметром переважаючої поляризації під кутом 45° . Параметр S_3 максимальний при $\delta = -\frac{\pi}{2}$ і $A=B$, тому має назву параметра переважно право-циркулярної поляризації.

Вектори Стокса для опису поляризації, які часто трапляються при розрахунках, мають такий вигляд:

для природного світла ($\langle \sin \theta \rangle = \langle \cos \theta \rangle = 0$):

$$S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.11)$$

для лінійно поляризованого світла з азимутом $\theta = 0^\circ$:

$$S = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.12)$$

для лінійно поляризованого світла з азимутом 45° :

$$S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.13)$$

для лінійно поляризованого світла:

$$S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1.14)$$

Загальна форма матриці Мюллера записується наступним чином:

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

Для визначення елементів матриці Мюллера певного пристрою по чергово посилають на нього природне світло, лінійно поляризоване світло з азимутом 0° та 45° і циркулярно-поляризоване світло та досліджують результат дії на виході пристрою. Отримуємо чотири матричні або 16 лінійних рівнянь для визначення 16 шуканих коефіцієнтів a_{ik} .

Якщо азимут досліджуваного елемента не рівний нулеві, то спочатку від осей X та Y потрібно перейти до власних осей елемента (повернути на кут χ), потім виконати перетворення, описане матрицею M, і перейти до вихідних осей (поворот на кут $-\chi$). Узагальнено матрицю Мюллера $\vec{M}$ запишемо таким чином

$$\vec{M} = \vec{T}(-\chi) \vec{M}_0 \vec{T}(\chi), \quad (1.15)$$

$$\vec{T}(\chi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\chi & \sin 2\chi & 0 \\ 0 & -\sin 2\chi & \cos 2\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

Якщо дію першого, другого та ін. елементів системи по ходу променя описують матрицями $M_1, M_2, \dots$, то параметри Стокса $S_{02}, S_{12}, \dots$, що дають змогу описувати пучок

світла на виході системи, розраховують перемноженням матриць справа наліво відповідно до формули

$$\begin{bmatrix} S_{02} \\ S_{12} \\ S_{22} \\ S_{32} \end{bmatrix} = \dots M_3 * M_2 * M_1 * \begin{bmatrix} S_{01} \\ S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \end{bmatrix}, \quad (1.17)$$

де перший індекс при символі визначає параметр згідно з (1.7), другий – вказує положення пучка: на вході системи (1) чи на виході з неї (2).

Матричний опис дії оптичної системи на світло компактний і може бути спрощений вдалим вибором азимутів (взаємним розміщенням напрямків коливань в елементах системи), однак реальний результат такої дії можемо побачити лише після виконання всіх операцій множення матриць. Зазвичай отримують складні вирази.

Однак, відомо чимало ситуацій, коли потрібно користуватися найбільш загальними виразами для матриць Мюллера. Зокрема, при вивченні просторової дисперсії світла у кристалах (еліптичне двопроменезаломлення), оптичних властивостей кристалів у несумірній фазі тощо, стикаємося з ситуацією, коли досліджувані ефекти можуть бути сумірними з ефектами, зумовленими недосконалістю оптичних елементів (термічні напруження у вікнах кріостатів, неповна поляризація світла у поляризаторах, його деполяризація при розсіюванні, недостатньо точне встановлення азимутів $\theta = 0$ і т. п.). У цьому випадку метод Мюллера, описаний у вигляді матриць з азимутами елементів $\theta \neq 0$, дає можливість оцінити експериментальні похибки, виявити найбільш «вразливі» місця в оптичній системі. У таких вимірах йдеться про кути $\theta \approx 10^{-2} - 10^{-3}$ градуса, що дає уявлення про порядок величин та вимоги до елементів системи.

2 КОСМІЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ АЕРОЗОЛЬ-UA: ЗАГАЛЬНИЙ СТАН

Головною метою космічного проекту Aerosol-UA є отримання даних вимірювань з супутника оптичних характеристик аерозольних і хмарних частинок в атмосфері Землі протягом досить тривалого проміжку часу. Створення бази таких даних необхідно для визначення впливу аерозолів на радіаційний баланс атмосфери Землі і на клімат планети. Відомо, що в даний час недостатньо інформації для якісного визначення впливу від аерозолів як природного так і антропогенної походження. База таких даних необхідна для визначення часового та просторового розподілу кількості, фізичних характеристик та хімічного складу тропосферних і стратосферних аерозолів і хмарних частинок у земній атмосфері та оцінки їхнього впливу на погоду, клімат і ступінь забруднення навколишнього середовища.

Комплекс наукової апаратури космічного експерименту Aerosol-UA складається з двох об'єднаних у моноблок приладів:

- скануючого поляриметра ScanPol;
- мультиспектрального іміджера-поляриметра MSIP

За допомогою них буде проводитися вивчення з борту космічного апарата на новій орбітальній платформі YuzhSat глобального розподілу та мікрофізичних характеристик аерозольних частинок та хмарних утворень в атмосфері Землі.

2.1 Скануючий поляриметр ScanPol

Ідея та концепція скануючого поляриметра ScanPol експерименту Aerosol-UA базується на розробках космічної місії NASA Glory, метою якої був моніторинг просторового і часового розподілу основних характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів в атмосфері Землі за допомогою поляриметра APS [2, 3, 4]. Однак, експеримент Glory не був виконаний у зв'язку з технічними проблемами ракети-носія під час запуску. На відміну від APS у поляриметрі ScanPol кількість спектральних каналів зменшено до шести у порівнянні з поляриметром APS, але введено новий спектральний канал на довжині хвилі 370 нм. Орбітальний скануючий поляриметр ScanPol призначений для вимірювання з високою точністю параметрів Стокса I , Q , U у спектральних каналах від ближньої ультрафіолетової (УФ) до короткохвильової інфрачервоної (ІЧ) області в широкому діапазоні фазових кутів з фотометричною точністю 4% та поляриметричною точністю $< 0.2\%$. Поляриметр ScanPol складається з скануючої системи з двох дзеркал, призначеної для передачі сонячного випромінювання, розсіяного досліджуваними ділянками системи атмосфера-поверхня, на вхідні зіниці всіх оптичних блоків одночасно. Пара дзеркал утворюють поляризаційно-нейтральну комбінацію, яка робить близько 40 обертів за хвилину в площині орбіти космічного апарата. Кутовий діапазон сканування поверхні Землі складає від -60° до $+50^\circ$ від напрямку в надир.

Поляриметр містить чотири оптичних блоки, два з яких забезпечують роботу УФ каналу та каналів у видимому діапазоні спектра (VIS-1, VIS-2) з робочим спектральним діапазоном

370–555 нм, а два (IR–1, IR–2) – у близькій ІЧ ділянці спектру з робочим спектральним діапазоном 865–1610 нм (див. рис. 2.1.а). Спектральні канали поляриметра блоків VIS використовуються для оцінки поглинаючої здатності тропосферного аерозолі та його вертикального розподілу (канал 370 нм, $\Delta\lambda=10$ нм), зондування аерозолі над океаном та земною поверхнею (410 нм, $\Delta\lambda=20$ нм), для визначення кольору океану та зондування аерозолі (555 нм, $\Delta\lambda=20$ нм). Оптичні блоки IR містять спектральні канали, необхідні для зондування аерозолі над океаном та сушею (канал 865 нм, $\Delta\lambda=40$ нм), для відокремлення сигналу хмар цирусів і стратосферних аерозолів, і відокремлення тропосферних та стратосферних аерозолів в разі потужних вивержень вулканів (1378 нм, $\Delta\lambda=40$ нм), а також канал для оцінки внеску поверхні у вимірюваний сигнал над сушею (1610 нм, $\Delta\lambda=40$ нм). У дужках вказані довжина хвилі максимуму пропускання кожного спектрального каналу та напівширина діапазону пропускання $\Delta\lambda$.

Оптичну схему приладу показано на рис. 2.1.а кожен з оптичних блоків складається з наступних елементів (послідовно, по ходу променя від скануючої системи): вхідного об'єктива, що формує проміжне зображення досліджуваного об'єкта, польової діафрагми (на рис. 2.1 не показано), коліматора.

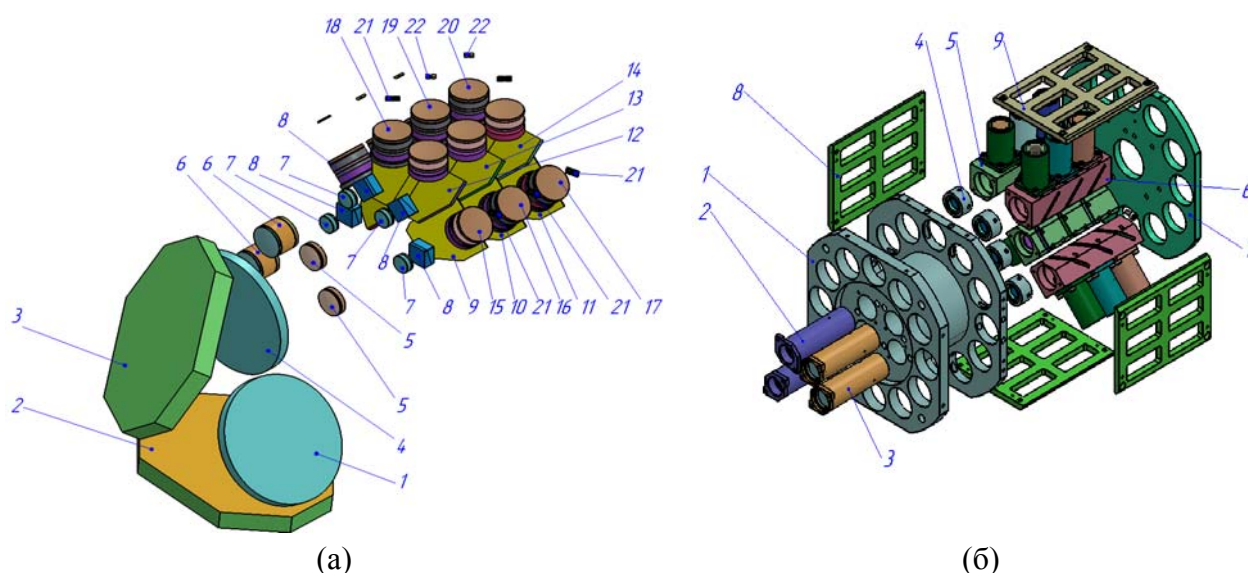


Рисунок 2.1 – Оптична схема поляриметра ScanPol (а) та загальний вигляд оптико-механічного блоку (б).

На оптичній схемі поляриметра ScanPol на рис. 2.1.а наведено наступні позначення:

1–4 – дводзеркальна система сканування, 5 – вхідний об'єктив оптичного блоку VIS, 6 – вхідний об'єктив оптичного блоку IR, 7, 8 – коліматор та призма Воластона, 9–14 – дихроїчні дзеркала відповідних спектральних діапазонів, 15–20 – система камерних об'єктивів та інтерференційних фільтрів для відповідних спектральних каналів, 21, 22 – приймачі випромінювання для видимого спектрального діапазону та ІЧ-діапазону.

Загальний вигляд оптико-механічного блоку зображено на рис. 2.1.б та має такі позначення:

1 – корпус, 2, 3 – вузол вхідного об'єктива та коліматора оптичного блоку VIS та IR, 4, 5, 6 – вузли призми

Призми Воластона розщеплюють випромінювання на компоненти S і P з ортогональною поляризацією і, таким чином, відіграють роль аналізатора, системи дихроїчних дзеркал та інтерференційних фільтрів виділяють необхідний вузький спектральний діапазон $\Delta\lambda$, та камерні об'єктиви формують по два зображення (S і P) на приймачах випромінювання (рис. 2.1.а).

2.2 Мультиспектральний іміджер-поляриметр MSIP

MSIP складається з п'яти оптичних каналів, три з яких поляризаційні, а два фотометричні (див. Таблицю 2.1). Також наведені довжини хвиль, та відповідні характеристики аерозолів, які визначаються.

На рис 2.2 наведено схематичне зображення каналу, яке ілюструє принцип побудови зображень в фокальній площині поляриметра. З фотометричної точки зору всі канали MSIP розділено на дві групи – короткохвильові (400–500 нм) і довгохвильові (500–920 нм). Камери обох груп подібні та максимально уніфіковані.

Таблиця 2.1 – Спектральні діапазони MSIP та їх характеристики. Символом *P* зазначено можливість проведення поляриметричних вимірювань.

№ каналу	Центральна довжина хвилі, нм (напівширина, нм)	Параметри, що визначаються
1	410 (20) P	Поглинання аерозолем та моніторинг сажі (black carbon)
2	443(20)	Поглинання аерозолем та висота аерозольного шару
3	470 (20)	Параметри аерозолю
4	490 (20)	Аерозоль, альbedo поверхні, оптична товщина хмар, показник відбиття від хмар
5	555 (20) P	Альbedo поверхні
6	670 (20)	Параметри аерозолю
7	865 (40) P	Рослинність, аерозолі, хмари, особливості поверхні
8	936 (20)	Водяна пара, корекція за атмосферу

В склад кожного із поляризаційних оптичних каналів включено:

1. ширококутний вхідний об'єктив, призначення якого формування заданого поля зору на польовій діафрагмі;
2. коліматор, що формує систему паралельних променів для проходження блоку “поляроїд – фільтр – призми”;
3. композитний елемент, що розділяє вихідну зіницю на чотири сегменти;
4. фільтр для виділення робочої довжини хвилі каналу;
5. ахроматичні призми для розведення чотирьох зображень поля зору;

6. камерний об'єктив для формування зображень поля зору.

Рисунок 2.2 ілюструє склад каналу MSIP та хід променів які показані для верхньої чверті системи призм.

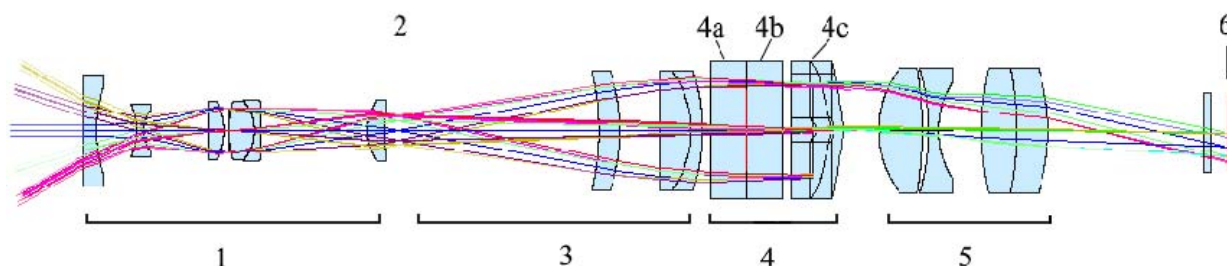


Рисунок 2.2 – Хід променів в оптичному каналі поляриметра MSIP для 400–500 нм.

Схема ходу променів в оптичному каналі поляриметра на рис. 2.2 має такі позначення:

1 –ширококутний вхідний об'єктив; 2– діафрагма поля зору; 3 – коліматор; 4 – система розведення зображень у складі: 4a – композитний поляризаційний елемент, 4b – спектральний фільтр, 4c – блок ахроматичних призм для розведення чотирьох зображень поля зору; 5 – камерний об'єктив; 6 – матричний приймач випромінювання.

У складі кожної оптичної системи фотометричного каналу 4a – складовий спектральний фільтр, що виконує ту ж функцію – розділює вихідну зіницю на чотири сегменти, елемент 4b відсутній.

Вхідна частина каналу MSIP сформована за класичною схемою ширококутного інвертованого телефотооб'єктиву і складається з двох частин: оберненої системи Галілея та власне об'єктиву з апертурною діафрагмою біля нього.

Система Галілея розширює поле зору, а її потужний від'ємний компонент формує негативну кривину поля всієї системи. Завдяки цьому конструкція камерного об'єктива може бути спрощена до двокомпонентного, у відповідності із рекомендаціями роботи [5].

Наприкінці вхідної частини, перед діафрагмою поля зору, встановлено лінзу–колектив, що виконує дві функції: виправлення деяких аберацій та, що важливіше – перенесення та формування вихідної зіниці у площі секторного поляризатора та призменної системи розведення зображень. Коліматор особливостей не має, за винятком зворотної склейки, застосування якої дає змогу зменшити аберації та збалансувати їх з аберациями двокомпонентного камерного об'єктива.

Для аналізу лінійної поляризації необхідно виконати чотири виміри інтенсивностей випромінювання, що пройшли через аналізатори поляризації. Було розроблено секторний поляризатор на основі комерційних поляризаційних плівок компанії Edmund Optics. Вказані плівки були орієнтовані з позиційними кутами 0° , 45° , 90° , 135° , а потім заклеєні між двома захисними вікнами. Ступінь затемнення того чи іншого сектора ілюструє роботу поляризаційного елемента. Повне затемнення у секторі відповідає випадку коли вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно перпендикулярні, світлий сектор – вектор електромагнітного поля випромінювання та поляризаційна вісь поляроїда взаємно паралельні.

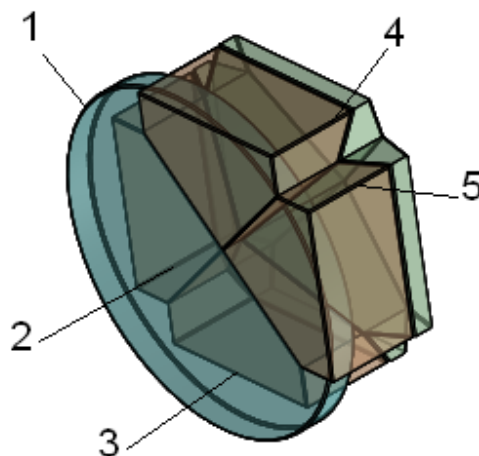


Рисунок 2.3 – Система розведення зображень: 1 – підкладка, 2–4 – пари ахроматичних клинів для кожного з чотирьох каналів.

Для розведення чотирьох зображень спостережуваного об'єкту використовується система відхиляючих призм, ахроматизованих для діапазону 400–900 нм. Система складається з двох склеєних клинів зі стекол K108-Ф101 в кожному каналі (рис. 2.3).

З огляду на уніфікацію оптичних схем каналів поляриметра MSIP як коротко- так і довгохвильового діапазонів, усі канали мають майже однакову конструкцію, яка відрізняється лише деякими відстанями між лінзами. Конструктивно поляриметр MSIP є сукупністю вузлів, показаних на рис. 2.4. Ці вузли з'єднуються за допомогою фланців. Габарити одного каналу: довжина – 302 мм, найбільший діаметр – 86 мм (фланець камери), сумарна маса усіх п'яти каналів – 4 кг. Загальний вигляд конструкції окремого каналу показаний на рис. 2.4.

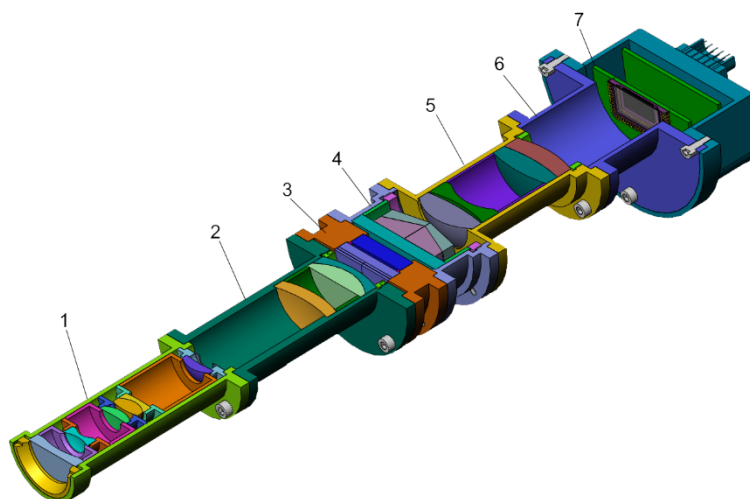


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд оптичного каналу MSIP (поляриметричний канал 555 нм) у розрізі.

Схема загального вигляду оптичного каналу MSIP у розрізі на рис. 2.4 має такі позначення:

1 – вхідний об’єктив; 2 – коліматор; 3 – поляризатор та фільтр; 4 – блок клинів; 5 – камерний об’єктив; 6 – проміжний фланець; 7 – ПЗЗ-камера.

2.3 Модифікація інструментів ScanPol та MSIP для використання на платформі Yuzhsat

Для забезпечення вимог проведення експерименту Aerosol-UA на платформі Yuzhsat розробниками проекту виконано суміщення бортових приладів ScanPol та MSIP в один суцільний моноблок, згідно параметрів платформи. Комп’ютерна модель результуючого модуля зображена на рис. 2.5, загальна оптична схема – рис. 2.6.

Параметри моноблоку ScanPol+MSIP (див. рис. 2.5):

- Габарити: $540 \times 300 \times 350$ мм³ (довжина × ширина × висота)
- Орієнтовна маса: 22 кг
- Середньодобова споживча потужність, орієнтовно: ≤ 50 Вт
- Оцінка об’єму даних для передачі з супутника на приймальні станції: ScanPol: ≤ 0.2 Гб/доба, MSIP: ≤ 37 Гб/доба, при застосуванні алгоритмів стиснення зображень 5 – 7 Гб/доба.

Макет розташування інструментів проекту Aerosol-UA на супутниковій платформі YuzhSat наведено на рис. 2.7.

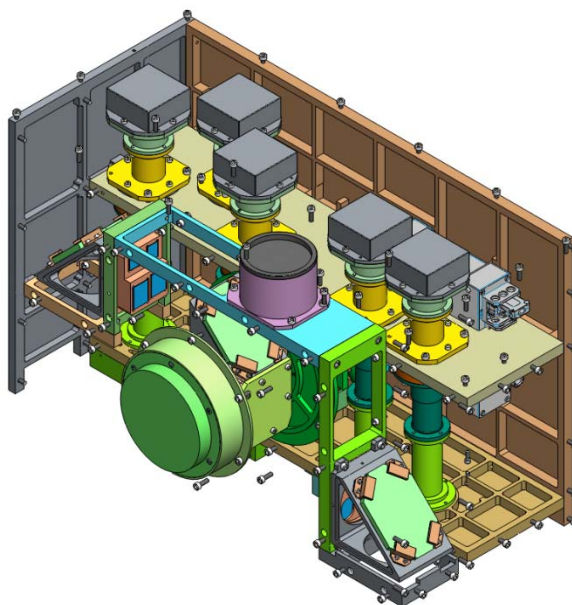


Рисунок 2.5 – Поляриметри ScanPol+MSIP у конфігурації єдиного модуля Aerosol-UA: адаптація до платформи YuzhSat.

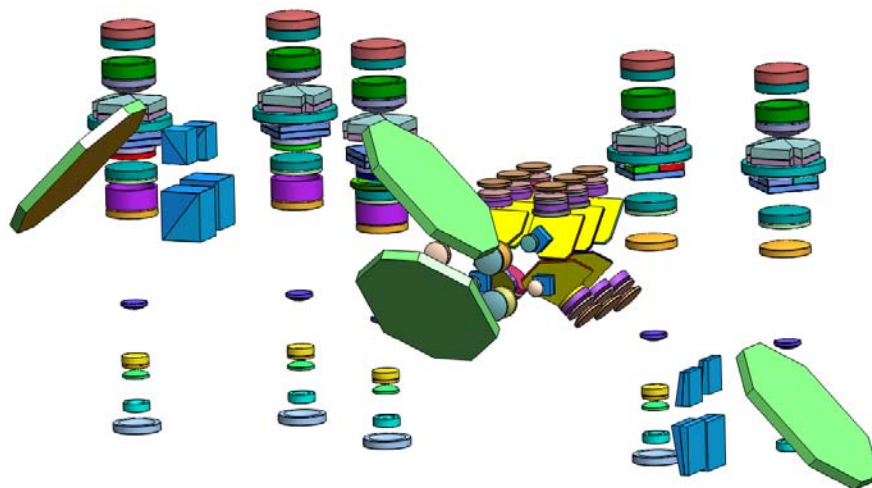


Рисунок 2.6 – Загальна оптична схема поляриметрів ScanPol+MSIP, скомпонованих до використання на платформі YuzhSat.

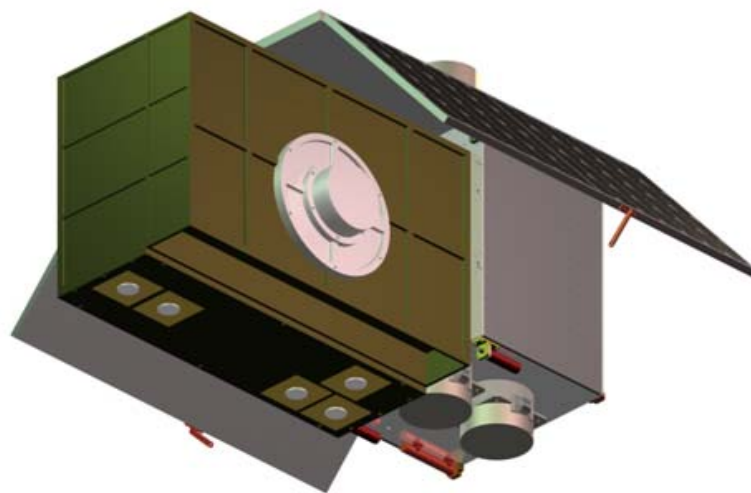


Рисунок 2.7 – Комп'ютерний дизайн розташування наукової апаратури проекту Aerosol-UA на орбітальній платформі YuzhSat.

2.4 Алгоритм GRASP для відтворення характеристик аерозолію.

Алгоритм GRASP (Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties) це перший універсальний алгоритм розроблений для отримання параметрів атмосфери по даним дистанційного зондування. Алгоритм GRASP був створений на базі алгоритму обробки даних іміджера POLDER/PARASOL Європейського космічного агентства [6], який був розроблений для спостереження яскравих поверхонь, таких як пустелі, відбивання від яких сильніше ніж сигнал від аерозолів. Крім того, в основу GRASP покладено ряд методів реалізованих у наземній мережі AERONET [7] з більш ніж 250 сонячними фотометрами, які використовуються для перевірки майже всіх супутникових спостережень атмосферних

аерозолів. За даними сонячних фотометрів отримують детальні характеристики аерозолів, включаючи поглинання і розсіювання частинками сонячного випромінювання, що дозволяє уточнити значення впливу аерозолів на зміну клімату. Проте, ці станції надають дані лише в місцях встановлення приладів, а з супутникових спостережень отримують просторово-часові характеристики аерозолів по всій планеті.

Алгоритм GRASP було засновано на принципах узагальнення з метою створення науково-достовірного, універсального, гнучкого, прозорого та доступного алгоритму. В основу алгоритму покладено 2 незалежні модулі. Перший модуль – чисельна інверсія (numerical inversion), яка включає в себе загальні математичні операції, не пов'язані з фізичною природою відтворених даних (в даному випадку даних дистанційного зондування). Другий модуль – пряма модель (forward model), яка розроблена для відтворення різних спостережень атмосфери дистанційними методами.

Чисельна інверсія реалізована як статистично оптимізоване згладжування спостережних даних на основі методу найменших квадратів (МНК), що поєднує в собі переваги різних підходів і забезпечує прозорість і гнучкість в створенні алгоритмів, які інвертують пасивні чи активні спостереження для отримання декількох груп невідомих параметрів. Наприклад, при відтворенні характеристик аерозолію за даними AERONET та PARASOL були застосовані обмеження гладкості функції одночасно для розподілу частинок за розмірами та спектральних залежностей показника заломлення аерозолію та коефіцієнтів відбивання поверхні.

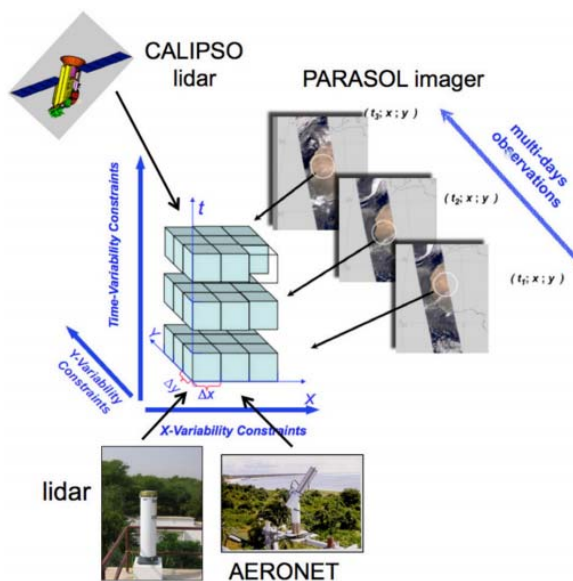


Рисунок 2.8 – Схема ілюструє принцип комбінування та обробки даних отриманих різними приладами з використанням наближення multi-pixel [7].

Крім того, в алгоритмі є можливість використовувати multy-term метод для відтворення параметрів аерозолію з великої групи пікселів супутникового спостереження одночасно [8]. Такий тип відтворення покращує узгодженість даних за допомогою накладання обмежень на зміну просторових і часових параметрів. Наприклад, для відтворення характеристик з даних PARASOL, просторові варіації аерозолію та часові варіації альbedo поверхні були згладжені введенням додаткових обмежень. Такий підхід можна використовувати для синергетичних

даних з використанням спостережень, які не в повній мірі збігаються в часових або просторових рамках (рис. 2.8).

За допомогою прямої моделі симулюється випромінювання атмосфери після взаємодії падаючого світла з атмосферними газами, аерозолями і підстилаючою поверхнею. Модель аерозолів включає суміш з двох компонент: для сферичних і несферичних частинок. Кожна з фракцій характеризується тим же розподілом часток за розмірами подібно як у відтворених характеристиках аерозолів за даними AERONET [9]. Несферична компонента моделюється у вигляді суміші випадково орієнтованих сфероїдів з фіксованим розподілом за формою [10].

Двопроменева функція відбивної здатності (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) і двопроменева функція поляризаційної здатності (bidirectional polarization distribution function, BPDF) використовуються для моделювання ефектів відбиття поверхнею. Алгоритм враховує багаторазове розсіювання сонячного світла аерозолями, газами і поверхнею, розв'язуючи рівняння переносу випромінювання з використанням формалізму послідовного розсіювання [11, 12]. Усі розрахунки проводяться в реальному часі та не вимагають використання попередньо розрахованих “довідкових таблиць”. Структура алгоритму дозволяє адаптувати його для тестування альтернативних процедур для обробки даних, що включають інформацію про аерозоль, поверхню, газ та багаторазове розсіювання. У залежності від вхідних даних, за допомогою GRASP можна відтворити характеристики аерозолів в стовпі атмосфери, вертикальний розподіл частинок та дані про параметри поверхні (рис. 2.9).

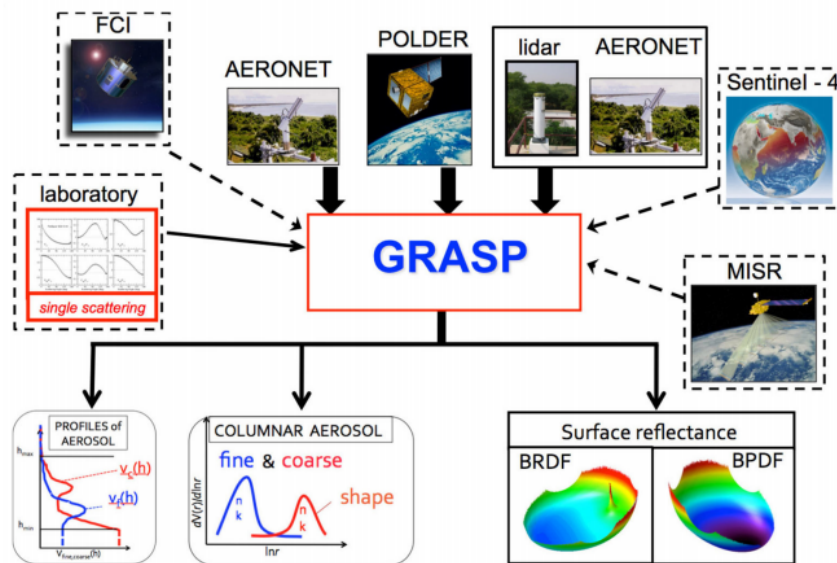


Рисунок 2.9 – Можливість застосування алгоритму GRASP для різних спостережень і потенційно відновлених вихідних характеристик. Жирними стрілками вказані розділи алгоритму, які в повному обсязі завершено. Три розділи внизу: профілі вертикального розподілу аерозолів, склад в стовпі атмосфери та параметри поверхні – можливі вихідні дані алгоритму [7].

Алгоритм GRASP був розроблений як пакет програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, який доступний для вільного використання. Науковим кодом GRASP можна керувати за допомогою framework, який може змінювати його конфігурацію, а також

параметри вхідних та вихідних даних. Крім того, наразі доступна версія алгоритму для паралельного обрахунку з використанням GPGPU (general-purpose computing on graphics processing units). Ця версія графічного процесора забезпечує достатню швидкість обчислень для складного алгоритму, такого як GRASP, що використовується для обробки великих масивів супутникових даних.

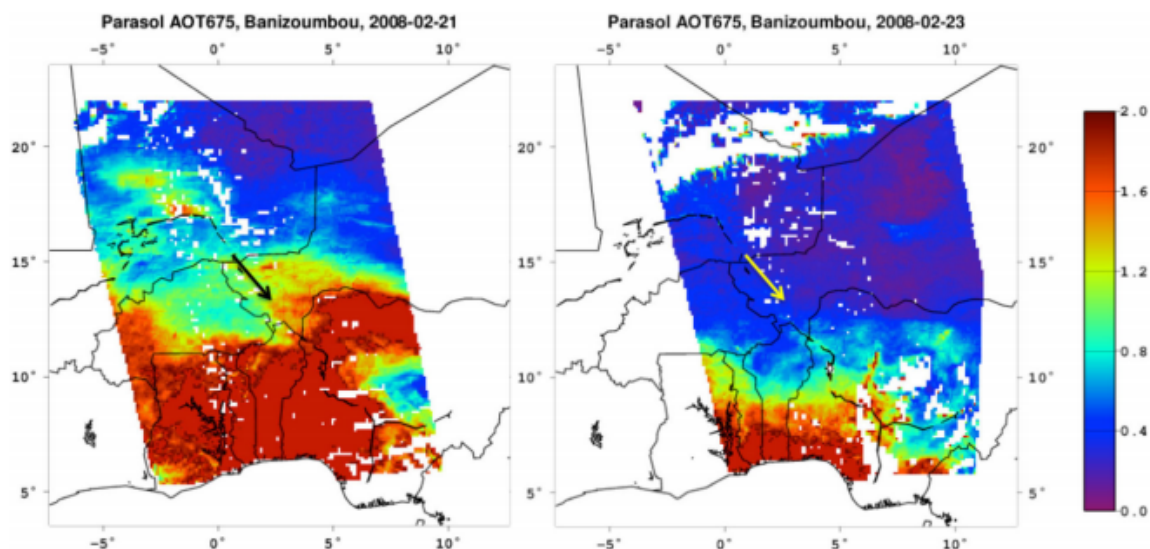


Рисунок 2.10 – Розподіл аерозольної оптичної товщини (AOT) на довжині хвилі 670 нм за даними двох послідовних спостережень POLDER/PARASOL 21 та 23 лютого 2008 року на ділянці 1800x1800 км [7].

GRASP – дуже гнучкий алгоритм, що дозволило його адаптувати для обробки даних спостережень поляриметром POLDER/PARASOL. На рисунку 2.10 показана аерозольна оптична товщина на довжині хвилі 670 нм, отримана при наявності яскравої поверхні в Африці з центром в Banizoumbou, Нігер за даними двох послідовнопроведених спостережень [7].

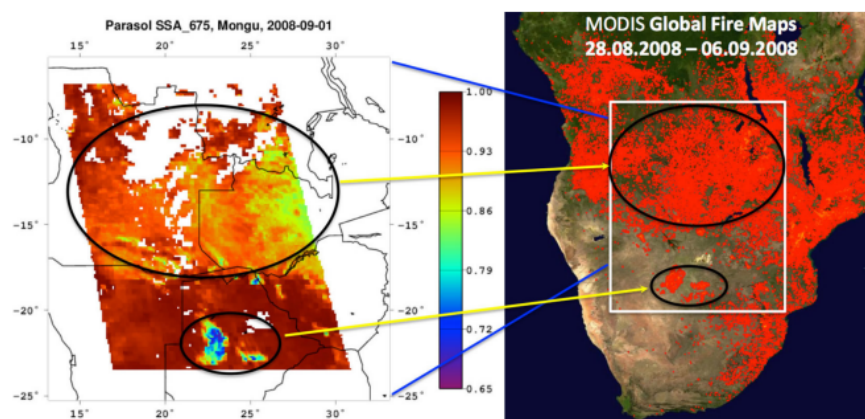


Рисунок 2.11 – Зліва: значення аерозолі ω_0 (0,67) за даними POLDER/PARASOL 1 вересня 2008р близько станції AERONET Монгу, Замбія. Справа: положення відкритого вогню за даними MODIS над тією ж територією [7].

На рисунку 2.11 показано альbedo одноразово розсіювання ω_0 (відношення параметра розсіювання до суми розсіювання плюс поглинання) за даними POLDER/PARASOL для 1 вересня 2008 року (поблизу станції AERONET Монгу, Замбія) для аерозолів продуктів горіння, що корелює з районами пожеж у лісах Центральної Африки за даними супутникового приладу MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) [6].

Прямі чисельні розрахунки показують, що алгоритм GRASP забезпечує значення аерозольної оптичної товщини (дрібнодисперсних та крупнодисперсних аерозолів) з точністю до 0.01 від вхідних значень. Варто зазначити, що значення розв'язку оптичної товщини та об'ємної концентрації для дрібнодисперсних аерозолів є точними якщо дійсна частина показника заломлення відома, а натомість для крупнодисперсних аерозолів є менш точними, але вони значно покращуються за наявності додаткових вхідних даних [8].

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОЛЯРИМЕТРА СКАНПОЛ

3.1 Опис завдання створення алгоритму обробки.

Відповідно до завдання даної роботи було встановлено точки входу і виходу даних в майбутньому алгоритмі. Цей алгоритм спеціалізується на даних ScanPol, не враховуючи дані MSIP. Нижче буде описано алгоритм для даних ScanPol, не враховуючи дані іміджер-поляриметра MSIP, оскільки для нього ще незавершена конструкторська документація.

На вході з АЦП маємо дані поляриметра ScanPol: шість спектральних каналів в ближній ультрафіолетовій (NUV), видимій (VIS) і ближній інфрачервоній (NIR) області спектра, зосереджених в довжинах хвиль 370, 410, 555, 865, 1378, 1610 нм, які складаються зі спостережень відбитого від поверхні Землі випромінювання під різними орієнтаціями площин поляризації з азимутами 0° , 90° , 45° та 135° . Кутовий діапазон сканування поверхні Землі складає від $+50^\circ$ до -60° від напрямку в надир. Кожен оберт скануючої системи надає близько 200 спостережень (з кроком у 0.5°) для шести каналів, кожен з яких складається з чотирьох параметрів (табл. 3.1). Крім того, для кожного оберту з телеметричних даних буде надаватися час спостережень, положення супутника на орбіті, його орієнтація у кожен момент спостереження.

Таблиця 3.1 – Кількість даних на вході алгоритму для одного оберту дзеркал.

Канали	370				410				555				865				1 378				1 610			
Орієнтація площини поляризації	0	45	90	135	0	45	90	135	0	45	90	135	0	45	90	135	0	45	90	135	0	45	90	135
Кут спостереження																								
-60,0																								
-59,5																								
-59,0																								
...																								
49,0																								
49,5																								
50,0																								

На виході потрібно отримати файл з впорядкованими даними для алгоритму GRASP, за допомогою якого можна отримати оптичні та фізичні характеристики атмосферного аерозолі. Кожен його рядок відповідає агрегованим даним для окремого пікселя спостереження. Таким чином в окремих рядках містяться спостереження з усіх положень супутника, коли даний піксель потрапив в поле зору поляриметра ScanPol.

Для формування файлу потрібно заповнити наступні параметри (**SDATA версії 2.0**):

1. Шапка:

- **NX** – кількість пікселів по координаті X (довгота)
- **NY** – кількість пікселів по координаті Y (широта)
- **NTIME** – кількість різних спостережень для тієї ж ділянки на поверхні

2. Тіло:

- **NPIXELS** – число одночасно спостережних пікселів в групі пікселів
- **TIMESTAMP** – час у форматі iso8601
- **HOBS** – висота в метрах, на якій знаходиться прилад над рівнем моря
- **IFGAS** = 1, якщо присутнє поглинання газами, = 0, якщо відсутнє
- **IX** – вказує на розташування пікселя вздовж координати X в обраній групі пікселів для відтворення.
- **IY** – вказує на розташування пікселя вздовж координати Y в обраній групі пікселів для відтворення.
- **cloudy** – індекс, що вказує на присутність хмар для кожного пікселя = 0 – хмарно, = 1 – відсутність хмар
- **x_coord_longitude** – географічка довгота пікселя
- **y_coord_latitude** – географічка широта пікселя
- **MASL** – висота над рівнем моря пікселя (MASL – Meters Above Sea Level)
- **land_percent** – відсоток суші в покритті пікселем
- **nwave_lengths** – кількість спектральних каналів
- **wave_length(IW)** – значення довжин хвиль в мікрометрах
- **num_meas_type(IW)** – кількість типів вимірювань на кожній довжині хвилі (1 – без поляризації, 3 – з поляризацією)
- **meas_type(IP,IW)** – типи вимірювань для кожної довжини хвилі (I,Q,U) – 41, 42, 43 – для кожної довжини хвилі
- **nvalid_meas(IP,IW)** – кількість напрямків спостережень для кожного типу вимірювань для кожної довжини хвилі
- **sza(IW)** – значення сонячних Zenітних кутів на кожній довжині хвилі
- **thetav(IV,IP,IW)** – значення спостережних Zenітних кутів для кожного напрямку спостережень, для кожного типу вимірювань, на кожній довжині хвилі
- **phi(IV,IP,IW)** – значення спостережних азимутальних кутів для кожного напрямку спостережень, для кожного типу вимірювань, на кожній довжині хвилі
- **FPSW(IV,IP,IW)** – вимірювані I, Q U послідовно до параметрів, описаних вище: “**nvalid_meas(IW)**, **num_meas_type(IW)** та **nwave_lengths**”, тобто для кожного напрямку спостереження записуємо величини параметрів Стокса послідовно для кожної довжини хвилі.
- **gaspar(IW)** – величини оптичної товщини поглинання (absorption optical thickness) для кожної довжини хвилі
- **IFCOV(IP,IW)** – присутність коваріантної матриці в даних для кожного типу спостережень для кожної довжини хвилі: = 0 коваріантна матриця не присутня, = 1 коваріантна матриця присутня
- **CMTRX(IV,IP,IW)** – елементи коваріантної матриці для кожного спостереження, якщо IFCOV(IP,IW)=1
- **IFMP(IP,IW)** – присутність молекулярного профілю в даних для кожного типу спостережень для кожної довжини хвилі: = 0 молекулярний профіль не присутній, = 1 молекулярний профіль присутній

• **MPROF(IV,IP,IW)** – значення молекулярного профілю на кожній висоті якщо IFMP(IP,IW)=1

Для вирішення поставленої задачі було розроблено план алгоритму, блок-схема якого зображена на рис. 3.1. Спочатку дані з ScanPol повинні пройти калібрування, на виході з якого матимемо параметри I,Q,U для кожного каналу. Потім для кожного спостереження потрібно обрахувати:

Зенітний і азимутальний кути спостереження;

Сонячний зенітний кут;

Координати ділянки земної поверхні, на яку направлений поляриметр;

Для останнього пункту земну поверхню було розбито на невеликі частини – пікселі. Як наслідок, кожна пара координат відповідає попередньо визначеному пікселю. Далі всі параметри і виміри потрібно правильно згрупувати по пікселям, та створити повноцінний файл для GRASP. Розглянемо детальніше кожен крок.

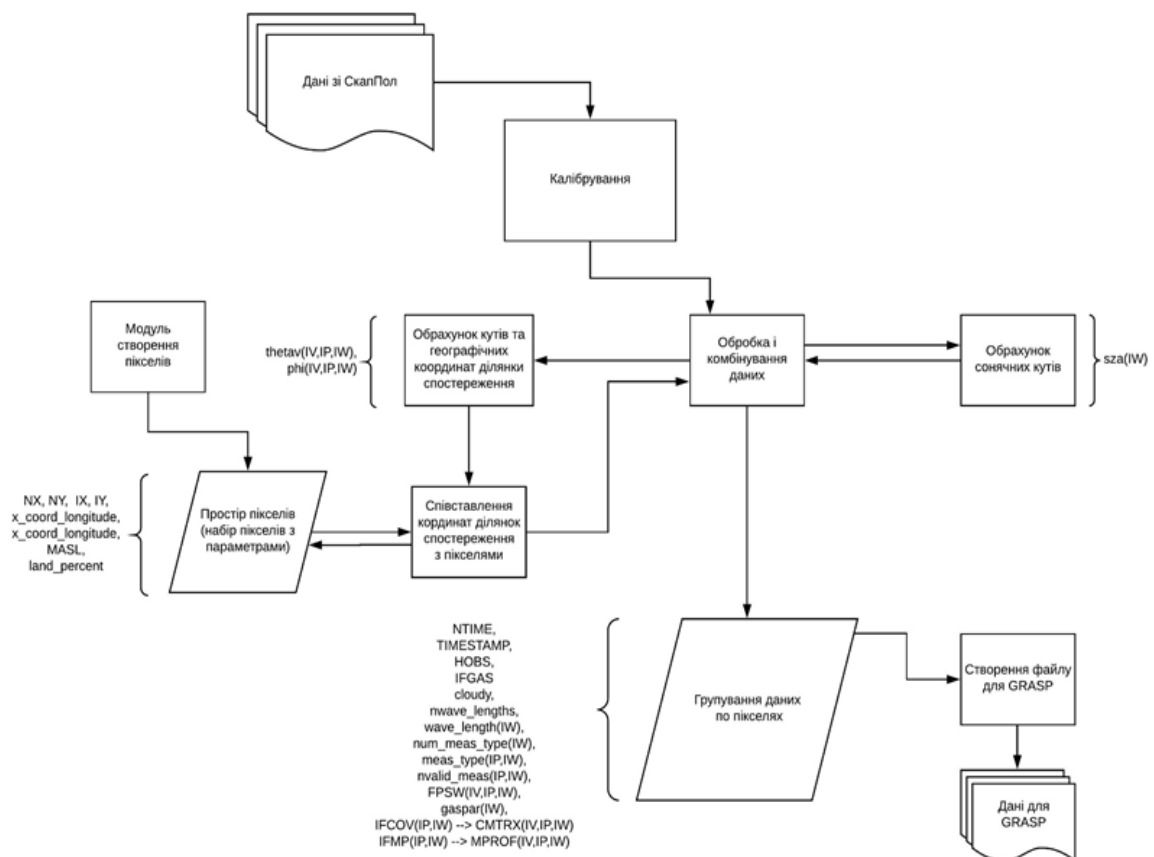


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму.

3.2 Калібрування.

Процес калібрування елементів скануючого поляриметра ScanPol передбачає наземне та орбітальне калібрування. Наземне калібрування передбачає визначення всіх калібрувальних параметрів відповідної матриці Мюллера та їх комбінацій для всіх кутів сканування системи дзеркал у всіх спектральних каналах. Орбітальне калібрування полягатиме в періодичній компенсації змін тих параметрів, що можуть бути визначені поза лабораторних умов, на основі спостереження сцен з відомими станами поляризації та інтенсивністю.

Калібрування на орбіті забезпечується використанням контрольних елементів, встановлених всередині інструмента ScanPol, показаного на рисунку 3.2. В якості деполаризатора обраний кварцовий клиновидний деполаризатор, який забезпечує неполяризоване з нульовим значенням контрольного світла значення DoLP у вхідному вікні ScanPol. Темний блок - це темна камера з адсорбційним покриттям для встановлення нульового рівня для реєстрації електроніки ScanPol. Сонячна одиниця - розсіювальна дифузійна пластина з добре відомою функцією розподілу двостороннього відбиття (BRDF) для радіометричного калібрування каналів інтенсивності ScanPol. Пристрій поляризаторів являє собою набір з чотирьох поляризаторів з призмою Глана із фіксованою добре відомою орієнтацією. Елемент поляризатора виробляє світло з лінійною поляризацією з високим значенням DoLP та добре відомою величиною AoLP. Система перехрещених дзеркал обертається та спрямовує світло, розкидане з надирного напрямку, яке передається і розсіюється з еталонних зразків до поляриметричних вимірювальних каналів ScanPol із осей, перпендикулярних площині на рис. 3.2 та паралельному осі дзеркала обертання системи.

В цій роботі реалізовано алгоритм орбітального калібрування, що базується на результатах наземного калібрування.

Узагальнене рівняння, що пов'язує між собою безпосередньо вимірювані величини (цифрові відліки на виходах АЦП - $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$) та шукані нормовані параметри Стокса $q=Q/I$ та $u=U/I$ випромінювання на вході скануючої системи ScanPol, має вигляд:

$$\frac{RD_{0^\circ} - K1 \cdot RD_{90^\circ}}{RD_{0^\circ} + K1 \cdot RD_{90^\circ}} = \frac{a_q^{-1} [(-q + q_{inst}) \cos(2\varepsilon_1) + (-u + u_{inst}) \sin(2\varepsilon_1)]}{1 + q_{inst}q + u_{inst}u}$$

$$\frac{RD_{45^\circ} - K2 \cdot RD_{135^\circ}}{RD_{45^\circ} + K2 \cdot RD_{135^\circ}} = \frac{a_u^{-1} [(-q + q_{inst}) \sin(2\varepsilon_2) + (-u + u_{inst}) \cos(2\varepsilon_2)]}{1 + q_{inst}q + u_{inst}u} \quad (3.1)$$

- ε_1 ε_2 – відхилення осей пропускання першої та другої призм Волластона від точних відповідних позицій кута ($0^\circ + \varepsilon_1$, $90^\circ + \varepsilon_1$, $45^\circ + \varepsilon_2$, $135^\circ + \varepsilon_2$);
- q_{inst} , u_{inst} – паразитні доданки до шуканих параметрів Стокса q та u , викликані поляризаційною недосконалістю телескопів та дзеркал приладу;
- a_q , a_u – параметри, що враховують паразитну деполаризацію випромінювання у вимірювальному тракті приладу внаслідок недосконалості поляризаторів та

неоднорідності поляризаційних характеристик телескопів та дзеркал у межах перетину робочого променя;

- q_{cal} , u_{cal} - калібрувальні параметри Стокса вхідного випромінювання при погляді в надир (задається в лабораторних умовах).

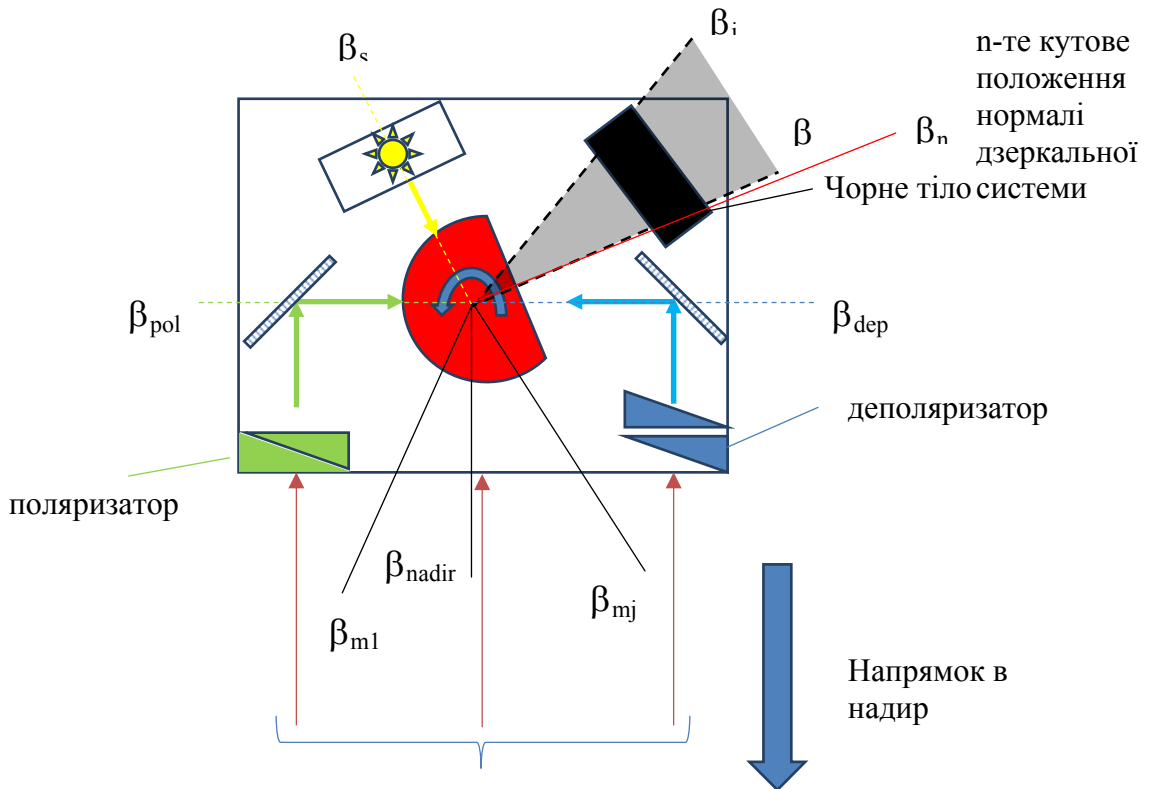


Рисунок 3.2 – Схема скануючої системи ScanPol.

Отримуючи на вході $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ - відліки АЦП у відповідних поляризаційних каналах після нескладних перетворень, що будуть описані нижче, маємо отримати відновлені параметри Стокса падаючого випромінювання та, на основі них, ступінь поляризації та кут поляризації.

Програма працює наступним чином:

- 1) Створюється об'єкт класу Calibration, в цей момент ініціалізуються всі параметри та змінні.
- 2) Запускається метод make_calibration. Його аргументи: $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ та D_list, що містить в собі значення рівнів «нуля» у каналах ($D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$):

$$D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ} = \frac{\sum_{k=0}^i D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ, \beta_k}}{(i-1)} \quad (3.2)$$

- 3) Обраховується середнє значення рівнів «нуля» за формулою (3.2)
- 4) Розраховується радіометричний коефіцієнт A.

Для напрямку нормалі вікна дзеркал β_s – вимірюємо інтенсивність каліброваного джерела і з неї маємо розрахувати спільний радіометричний масштабуючий множник A , що дозволить нуль компенсовані відліки АЦП перевести у інтенсивність відповідно NIST.

5) Розраховуються параметри:

$$RD_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ} = R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ} - D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ} \quad (3.3)$$

6) При першому виклику методу розраховуються в початковому наближенні коефіцієнти a_q , a_u , $K1$, $K2$ за формулами:

$$K1 = \frac{(RD_{0^\circ})}{(RD_{90^\circ})}, \quad K2 = \frac{(RD_{45^\circ})}{(RD_{135^\circ})} \quad (3.4)$$

$$a_q = \frac{1 + e_1}{1 - e_1}, \quad a_u = \frac{1 + e_2}{1 - e_2}, \quad (3.5)$$

де $1/e_1$, $1/e_2$ - відношення згасання для кожної призми Волластона.

7) Розраховуються коефіцієнти c , s , $\Delta I_{0^\circ, 90^\circ}$, $\Delta I_{45^\circ, 135^\circ}$ за формулами:

$$c_{1,2} = \cos(\varepsilon_{1,2}), \quad s_{1,2} = \sin(\varepsilon_{1,2}), \quad (3.6)$$

$$\Delta I_{0^\circ, 90^\circ} = \frac{RD_{0^\circ} - K1 \cdot RD_{90^\circ}}{RD_{0^\circ} + K1 \cdot RD_{90^\circ}} a_q, \quad \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} = \frac{RD_{45^\circ} - K2 \cdot RD_{135^\circ}}{RD_{45^\circ} + K2 \cdot RD_{135^\circ}} a_u \quad (3.7)$$

8) Уточнюються a_q , a_u , $K1$, $K2$ з урахуванням q_{cal} , u_{cal} , q_{inst} , u_{inst} для використання при наступній ітерації:

$$K1' = \left(\frac{1 - a'_q q'_{inst}}{1 + a'_q q'_{inst}} \right) \frac{RD_{0^\circ}}{RD_{90^\circ}}; \quad K2' = \left(\frac{1 - a'_u u'_{inst}}{1 + a'_u u'_{inst}} \right) \frac{RD_{45^\circ}}{RD_{135^\circ}}; \quad (3.8)$$

де

$$\begin{aligned} q'_{inst} &= q_{inst} \cos(2\varepsilon'_1) + u_{inst} \sin(2\varepsilon'_1) \\ u'_{inst} &= -q_{inst} \sin(2\varepsilon'_2) + u_{inst} \cos(2\varepsilon'_2) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Маючи щойно уточнені $K1'$ і $K2'$ калібруємо коефіцієнти a_q та a_u . При погляді в надир через поляризатори вхідне випромінювання матиме лінійну поляризацію з встановленим азимутом (задається в лабораторних умовах на Землі). Таким чином, параметри Стокса вхідного випромінювання точно відомі і їх використовують як калібрувальні q_{cal} та u_{cal} . Можемо знайти значення двох калібрувальних параметрів a_q та a_u , при відомих інших:

$$\alpha_q = \frac{q'_{cal} + q'_{inst}}{\frac{RD_{0^\circ} - K1 \cdot RD_{90^\circ}}{RD_{0^\circ} + K1 \cdot RD_{90^\circ}} (1 + q_{cal} q_{inst} + u_{cal} u_{inst})}; \quad \alpha_u = \frac{u'_{cal} + u'_{inst}}{\frac{RD_{45^\circ} - K2 \cdot RD_{135^\circ}}{RD_{45^\circ} + K2 \cdot RD_{135^\circ}} (1 + q_{cal} q_{inst} + u_{cal} u_{inst})}; \quad (3.10)$$

де

$$\begin{aligned} q'_{cal} &= -q_{cal} \cos(2\varepsilon_1) - u_{cal} \sin(2\varepsilon_1) \\ u'_{cal} &= q_{cal} \sin(2\varepsilon_2) - u_{cal} \cos(2\varepsilon_2) \end{aligned}$$

Для калібрування оптимально використовувати призми Глана орієнтовані під кутом 22.5° , до осей призм Волластона оскільки при цьому значення калібрувальних параметрів Стокса будуть однаковими:

$$q_{cal} = \cos(2 \cdot \pi / 8) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad u_{cal} = \sin(2 \cdot \pi / 8) = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

9) Розраховуються параметри Стокса q , u за формулами, які можна отримати з (3.1):

$$q = \frac{q_{inst}s_2 \left(s_1 + u_{inst} \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} \right) - (1 + u_{inst}^2) \left(c_2 \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} - s_1 \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} \right) + c_1 q_{inst} \left(c_2 + u_{inst} \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} \right)}{s_1 s_2 + c_2 q_{inst} \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} + s_2 u_{inst} \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} - q_{inst} s_1 \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} + c_1 \left(c_2 + u_{inst} \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} \right)} \quad (3.11)$$

$$u = \frac{c_1 c_2 u_{inst} - (s_2 + q_{inst}^2 s_2 - c_2 q_{inst} u_{inst}) \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} - c_1 (1 + q_{inst}^2) \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} + s_1 u_{inst} (s_2 - q_{inst} \Delta I_{45^\circ, 135^\circ})}{s_1 s_2 + c_2 q_{inst} \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} + s_2 u_{inst} \Delta I_{0^\circ, 90^\circ} - q_{inst} s_1 \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} + c_1 \left(c_2 + u_{inst} \Delta I_{45^\circ, 135^\circ} \right)}$$

10) Визначається ступінь поляризації (DoLP) та кут поляризації (AoLP) за формулами:

$$DoLP = p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad (3.12)$$

$$AoLP = \theta_{real} = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{u}{q} \right) - \theta_{TMS} \quad (3.13)$$

де $\theta_{TMS} = 90^\circ - \beta_{nadir}$, оскільки кут поляризації повертається синхронно зі скануючою системою.

Ця послідовність повторюється для кожного виміру в усіх каналах. Код програми поданий в додатку.

Після відпрацювання цих пунктів програма повертає словник із значеннями відновленими значеннями q , u , AoLP, DoLP, які далі передаються в блок обробки і комбінування даних.

3.3 Розбиття на пікселі

Кутовий діапазон сканування поляриметром ScanPol поверхні Землі складає від $+50^\circ$ до -60° від напрямку в надир, а миттєве поле зору 0.5° . У проекції на земну поверхню це 2300 км, а ширина поля зору – 6 км. При цьому кількість спостережних кутів одиничної площадки складає близько 200.

На рис. 3.3 проілюстровано заплановане проведення спостережень приладами ScanPol та MSIP з борту орбітального апарату.

Для розбиття земної поверхні на пікселі була застосована глобальна цифрова висотна модель GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) [26], яка дозволяє отримати висоту точки над рівнем моря з просторовою роздільною здатністю до 15 арксекунди (до 463 метра на поверхні Землі) за відомими географічними координатами. Оскільки така роздільна здатність перевищує роздільну здатність приладу, вирішено

використати усереднені дані з шириною пікселя в 0,125 градуса (~13.75 км на поверхні Землі).

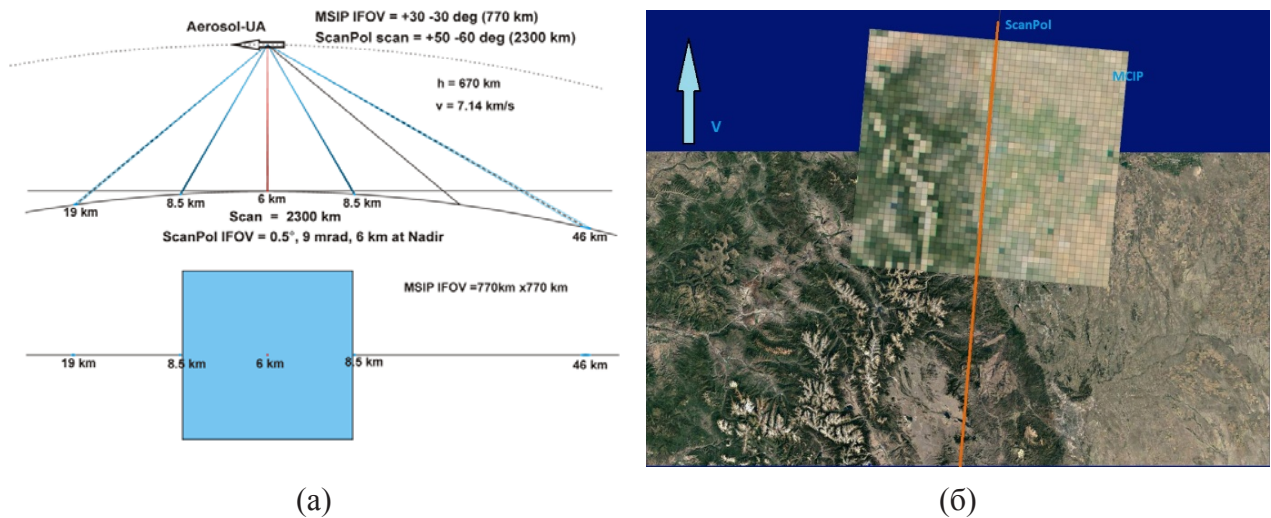


Рисунок 3.3 – Геометрія сканування приладами ScanPol та MSIP. Прямокутником зображене поле зору MSIP у випадку плоскої Землі, лінією - шлях сканування ScanPol.

З сайту (<http://www.temis.nl/data/gmted2010/>) взято файл в форматі HDF-4, що містить в собі набір пікселів з потрібною нам роздільною здатністю та усередненими параметрами, опис яких вказаний в таблиці 3.2.

На рис. 3.4 зображено карту, побудовану на GMTED2010 з роздільною здатністю 0,5 градуса (<https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010>).

Таблиця 3.2 – Набір змінних у файлах з даними GMTED2010

Змінні	Одиниці	Розмірність	Опис
longitude	градуси	nlon	Довгота центра пікселя
Latitude	градуси	nlat	Широта центра пікселя
longitude_bounds	градуси	nlon,nbounds	Довгота меж пікселя
latitude_bounds	градуси	nlat,nbounds	Широта меж пікселя
elevation	метри	nlat,nlon	Висота над рівнем моря в наближенні геоїда
elevation_stddev	метри	nlat,nlon	Стандартне відхилення висоти над рівнем моря
elevation_max	метри	nlat,nlon	Максимальна висота над рівнем моря в межах пікселя
elevation_min	метри	nlat,nlon	Мінімальна висота над рівнем моря в межах пікселя

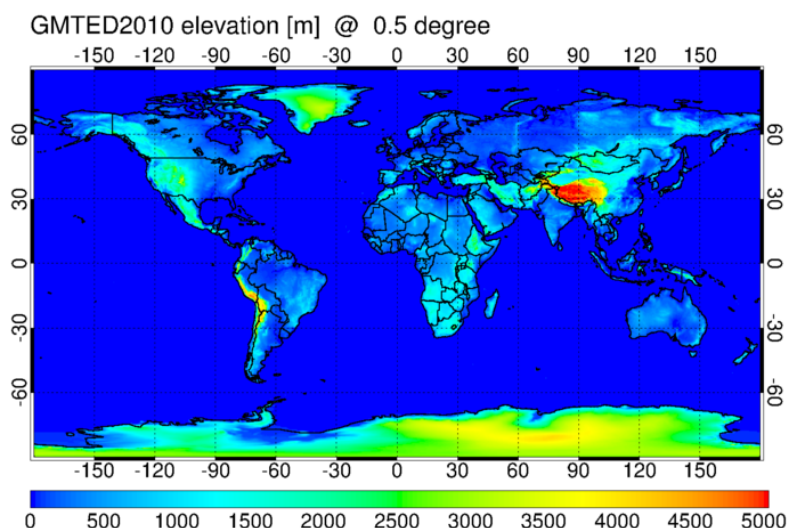


Рис. 3.4 Карта висот над рівнем моря, побудована для даних GMTED2010 з роздільною здатністю 0,5 градуса (<https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010>).

3.4 Розрахунок сонячних кутів

Для розрахунку сонячних кутів було вирішено використати готове рішення Pysolar (<http://docs.pysolar.org/en/latest/>), тобто колекцію бібліотек Python для імітації будь-якої точки на Землі освітленою Сонцем. Вона включає в себе код для надзвичайно точних ефемерних обчислень та багато іншого. Pysolar була підтверджена Військово-морською обсерваторією Сполучених Штатів (USNO).

Маючи три параметри: довготу, широту і час спостереження (UTC) отримуємо кут нахилу Сонця за допомогою Pysolar. Нескладними геометричними обрахунками знаходимо сонячний зенітний кут (рис. 3.5).

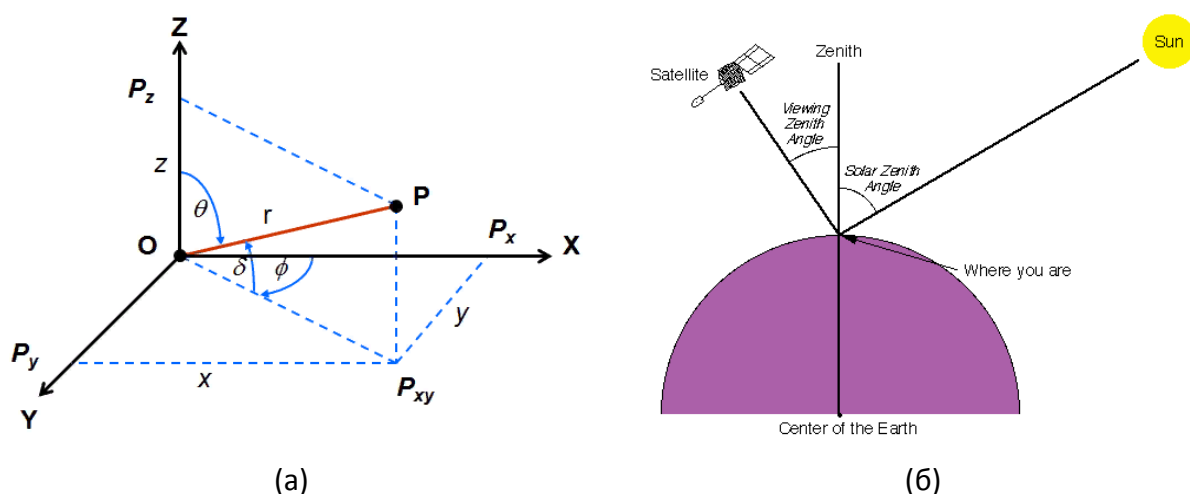


Рисунок 3.5 – Геометрія розміщення Сонця: а) в системі координат: P – Сонце, θ – зенітний кут, δ – кут нахилу, ϕ – азимутальний кут. б) на практиці [29, 30].

3.5 Завершальні етапи обробки

Отримавши відкалібровані параметри Стокса вхідного випромінювання, координати пікселів, значення сонячного кута та інші телеметричні дані, залишається згрупувати все відносно ділянок спостереження (рис. 3.5). До цього моменту всі спостереження прив'язані до положення супутника. Тобто супутник кожним обертом дзеркал захоплює певну зв'язку ділянок і дані сортуються по часу спостереження. Протягом декількох обертів дзеркал одна й та сама ділянка спостерігається певну кількість разів. Ця кількість залежить від швидкості руху супутника та його розміщення відносно цієї ділянки. Чим частіше ділянка потраплятиме в поле зору ScanPol, тим точніші будуть результати роботи відновлення параметрів аерозолів за рахунок переважання кількості незалежних спостережень (вхідних параметрів) над тими, що шукаються.

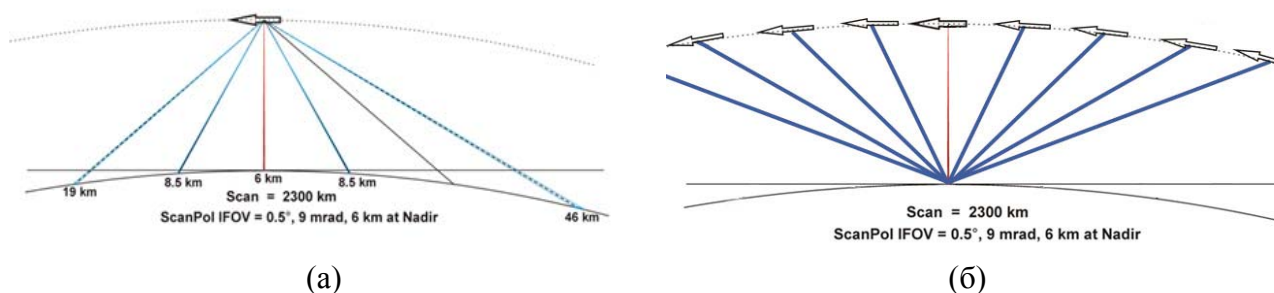


Рисунок 3.6 – Ілюстрація групування даних на початку обробки (а) і на вході в GRASP (б).

Вже згруповані по ділянкам дані для кожного спектрального каналу записуються в файл, структура якого описана на початку розділу. За допомогою алгоритму GRASP буде розв'язана зворотна задача розсіювання та, в результаті, створена база даних оптичних характеристик аерозольних і хмарних частинок в атмосфері Землі протягом досить тривалого проміжку часу.

ВИСНОВКИ

Розроблено концепцію та структуру алгоритму обробки даних для багатоканального скануючого поляриметра СканПол. Алгоритм планується використовувати при реалізації українського космічного проекту Аерозоль-UA.

Реалізовано програмний модуль орбітального калібрування, яке враховує: (1) зміщення взаємної орієнтації оптичних осей дзеркал в системі та призм Волластона; (2) інструментальний вплив на поляризацію вхідного випромінювання, що залежить від анізотропних характеристик дзеркальної системи та телескопів; (3) відмінність коефіцієнтів передачі та підсилення фотоприймачів різних каналів та значення рівнів нуля сигналу.

Адаптовано калібрування до технічних вимог конструкції приладу, а саме - розміщення калібрувальних блоків. Запропоновано програмне рішення обрахунку сонячних зенітних кутів для ділянок спостереження. Розроблено методику географічної прив'язки спостережень та запропоновано можливу реалізацію через використання даних GMTED2010. Отримана необхідна структура файлу для обробки даних алгоритмом GRASP, тобто реалізовано алгоритм по вибору даних з файлів, що містять інформацію по обертам дзеркал.

Таким чином продовжено розробку методики та програмного забезпечення для обробки сигналів поляриметра СканПол і перетворення отриманих даних в інформаційний блок, необхідний для введення в алгоритм GRASP, який має розв'язувати обернену задачу визначення характеристик аерозолі за розсіяним світлом. За результатами виконання Договору підготовлено до публікації дві статті, одна з них увійшла у звіт.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chipman, R. A., Lam, W. S. T., Young, G. Polarized Light and Optical Systems. 2018. CRC Press, Taylor & Francis Group. Series: Optical Sciences and Applications of Light. 982 p. ISBN 9781498700566

2. Яцків Я.С., Мищенко М.И., Розенбуш В.К., Д. Н. Шаховской, И. И. Синявский, Г. П. Милиневский, Н. Н. Киселев, Ю. С. Иванов, В. Н. Петухов, В. О. Данилевский, А. П. Бовчалоук. Проект “Аэрозоль”: дистанционное зондирование аэрозолей в земной атмосфере со спутника // Космічна наука і технологія. – 2012. – 18, № 4. – С. 3–15.

3. Mishchenko, M. I., Cairns, B., Kopp, G., Schueler, C. F., Fafaul, B. A., Hansen, J. E., Hooker, R. J., Itchkawich, T., Maring, H. B., and Travis, L. D.: Accurate monitoring of terrestrial aerosol and total solar irradiance: Introducing the GLORY mission. Bull. Am. Meteorol. Soc., 80(11), 2229–2259, 2007.

4. Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., Syniavskiy I., Mishchenko M., Rosenbush V., Ivanov Yu., Makarov A., Bovchaliuk A., Danylevsky V., Sosonkin M., Moskalov S., Bovchaliuk V., Lukenyuk A., Shymkiv A., Udodov E. New satellite project "Aerosol-UA": remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere // Acta Astronautica – V. 123. – 2016. – P. 292–300. doi:10.1016/j.actaastro.2016.02.027.

5. Mishchenko, M. I., Cairns, B., Kopp, G., Schueler, C. F., Fafaul, B. A., Hansen, J. E., Hooker, R. J., Itchkawich, T., Maring, H. B., and Travis, L. D.: Accurate monitoring of terrestrial aerosol and total solar irradiance: Introducing the GLORY mission. Bull. Am. Meteorol. Soc., 80(11), 2229–2259, 2007.

6. Tanre, D., Breon, F. M., Deuze, J. L., Dubovik, O., Ducos, F., Francois, P., Goloub, P., Herman, M., Lifermann, A., and Waquet, F. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission, Atmos. Meas. Tech., 4, 1383-1395, doi:10.5194/amt-4-1383-2011, 2011.

7. Dubovik, O., Laponak, T., Litvinov, P., Herman M., Fuertes D., Ducos, F., Torres B., Derimian Y., and Huang, X.: GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere, SPIE Newsroom. doi:10.1117/2.1201408.005558, 2014.

8. Dubovik, O., Herman, M., Holdak, A., Lapyonok, T., Tanré, D., Deuzé, J. L., Ducos, F., Sinyuk, A., and Lopatin, A.: Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations, Atmos. Meas. Tech., 4, 975-1018, doi:10.5194/amt-4-975-2011, 2011.

9. Dubovik O. and King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* – 2000. – 105. – P. 20673–20696.
10. Dubovik, O., Sinyuk, A., Lapyonok, T., Holben, B. N., Mishchenko, M., Yang, P., Eck, T. F., Volten, H., Munoz, O., Veihelmann, B., van der Zande, W. J., Leon, J.-F., Sorokin, M., and Slutsker, I.: Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust, *J. Geophys. Res.*, 111, D11208, doi:10.1029/2005JD006619, 2006.
11. Lenoble J., Herman M., Deuzé J. L., Lafrance B., Santer R., and Tanré D. A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2007. – 107(3). – P. 479–507.
12. Lenoble J., Remer L. and Tanré D. *Aerosol Remote Sensing* // Berlin: Springer, Heidelberg, 2013. – 390 p.
13. Litvinov P., Hasekamp O., Cairns B. and Mishchenko M. Reflection models for soil and vegetation surfaces from multiple-viewing angle photopolarimetric measurements // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2010. – 111(4). – P. 529–539, doi:10.1016/j.jqsrt.2009.11.001.
14. Waquet F., Leon J.-F., Cairns B., Goloub P., Deuze J.-L., Auriol F. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land // *Appl. Optics.* – 2009. – 48. – P. 1228–1236.

Додаток А. МОДЕЛЮВАННЯ КАЛІБРУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ КОСМІЧНОЇ МІСІЇ АЕРОЗОЛЬ-UA

Стаття, підготовлена до друку у журналі *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* і пройшла перший етап рецензування..

Polarimetric modeling and calibration of the Aerosol-UA space mission instruments

Gennadi Milinevsky^{a,b,c,*}, Yevgen Oberemok^b, Ivan Syniavskyi^c, Andrii Bovchaliuk^c, Ivan Kolomiets^b, Igor Fesyanov^b

^a *International Center of Future Science, Jilin University, Changchun, 130012, China*

^b *Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 01601, Ukraine*

^c *Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 03143, Ukraine*

*Corresponding author: Gennadi Milinevsky, International Center of Future Science, Jilin University, Qianjin Street 2699, Changchun, 130012, P.R. China; co-working in Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine and Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
e-mail: genmilinevsky@gmail.com

Abstract

The polarimetric modeling for the multispectral Scanning Polarimeter (ScanPol) and the MultiSpectral Imaging Polarimeter (MSIP), the instruments of the Aerosol-UA space mission, has been developed. The polarimeters will measure with high precision the degree of linear polarization (DoLP) and angle of linear polarization (AoLP) of sunlight scattered by clouds and aerosols. The polarimetric models include main sources of systematic polarimetric errors such as finite extinction ratios and offsets of polarizers and birefringence of telescopes, which are all described by Mueller matrices. The dark reference signal, the difference in the polarimeter channels gain, and instrumental depolarization factor are modeled as an additive values and scalar multipliers. The polarimetric models are the products of specified Mueller matrices and scalar values that tend to describe precisely a transformation of the incoming light polarization and intensity during light propagation through the ScanPol and the MSIP optical units. The model allows calibration procedures that provide accurate assess and effective compensation of the polarimeter instrumental polarization imperfection. It is assumed the ground-based stage calibration of both the ScanPol and MSIP instruments, in-orbit permanent calibration of the ScanPol instrument with onboard reference units, and in-orbit intercalibration of the ScanPol and the MSIP, since their fields of view are overlapped. To validate the effectiveness of proposed calibration procedures the numerical experiments were carried out. They show an excellent compensation of the ScanPol and the MSIP polarization errors by ground-based calibration procedures. The imperfection compensation is restricted only by the quality of reference sources and signal-to-noise ratio. In-orbit calibration

procedure demonstrates an acceptable result that provides the measurement of the DoLP with required error $< 0.15\%$ and AoLP with error < 0.2 degrees (in the case when $\text{DoLP} > 0.2$) for the ScanPol instrument. The ground-based calibration of the MSIP polarimeter will provide the expected polarimetric accuracy $< 1\%$ supplemented by the ScanPol and MSIP polarimeters on-board intercalibration.

Keywords: atmosphere; aerosol; climate; polarimeter; degree of linear polarization; calibration

1. Introduction

The distribution and microphysical properties of aerosols in the Earth atmosphere are still less known in comparison to main greenhouse gases to be used for the improvement of the climate models. Several new aerosol space missions are planned to collect data to reduce aerosol climate forcing uncertainties. The Aerosol Cloud Ecosystems (ACE) mission (NASA) is planned for launch in 2021 to minimize the climate forcing uncertainty in aerosol–cloud interactions and ocean–atmosphere carbon dioxide exchange (Starr, 2011). The aerosol polarimeter of the project 3MI/EPs-SG is planned for launch in 2020 or later to be next to the nine years operation of the POLDER/PARASOL (CNES) aerosol space mission (Bréon et al., 2011; Fougnie et al., 2018). The Multiangle SpectroPolarimetric Imager (MSPI) is planned as the possible instrument for ACE mission, and the SPEX instrument that developed in the Netherlands Institute for Space Research, NWO-SRON (Diner et al., 2007; van Harten et al., 2011). The comprehensive set of spaceborne aerosol polarimeters are currently designed in China. The Directional Polarization Camera (DPC), which is the POLDER-type polarimeter, to monitor global atmospheric aerosol has been launched in 2018 onboard GaoFen-5 satellite (Li et al., 2018). The Particulate Matter Polarization Suits (PMPS) instruments consist of the DPC camera and the Atmospheric Particulate Observing Scanning Polarimeter (POSP) that is developing for launch in 2019.

The Ukrainian space mission Aerosol-UA is prepared with main objective to monitor the microphysics and spatial distribution of atmospheric aerosols. The mission includes the multispectral Scanning Polarimeter ScanPol and the MultiSpectral Imaging Polarimeter (MSIP), which is planned to launch in 2022. The ScanPol polarimeter is designed on principles of the APS/Glory polarimeter (Mishchenko et al., 2007). The MSIP is the multispectral wide-angle imaging polarimeter providing the aerosol measurements and aerosol/clouds separation, which important for the ScanPol data corrections. The two Aerosol-UA instruments, combined as a set at the same satellite platform, can provide multi-angular (along-track) polarized radiance measurement with considerable swath (60 degrees provided by MSIP). Besides, the onboard calibration function of the ScanPol provides a chance of the two instruments inter-calibration (Section 5) since their fields of view are partly overlapped.

In this paper, the polarimetric model is developed, which includes the main sources of systematic polarimetric errors of the ScanPol and MSIP polarimeters described by the Mueller matrix approach. In Section 2 the Aerosol-UA instruments are described. In Sections 3 and 4 the calibration modeling of the ScanPol and the MSIP is considered. The intercalibration of the ScanPol and MSIP polarimeters is discussed in Section 5, the validation of the calibration results in the numerical experiment is considered in Section 6. Section 7 contains the discussion and conclusions.

2. Aerosol-UA mission instruments

2.1. ScanPol scanning polarimeter

The space mission Aerosol-UA is based on two instruments: the ScanPol polarimeter and the MSIP polarimeter (Milinevsky et al., 2015; 2016). The ScanPol is the multispectral scanning polarimeter with six spectral channels in the near ultraviolet (NUV), visible (VIS) and the shortwave infrared (SWIR) spectral channels. The spectral channels are centered at the wavelengths 370, 410, 555, 865, 1378, 1610 nm.

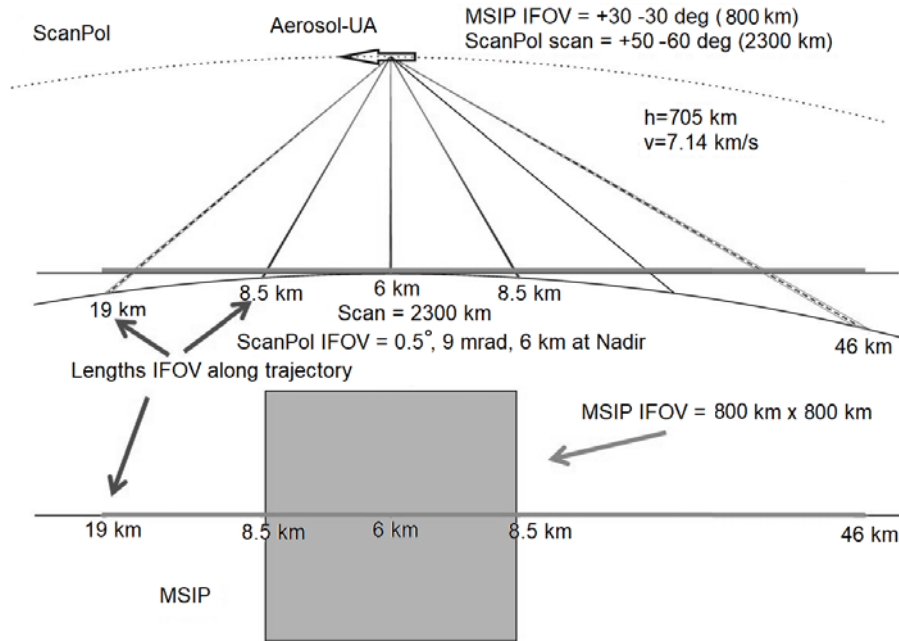


Fig. 1. Scanning geometry in Aerosol-UA mission. Intersection of the ScanPol and MSIP polarimeters fields-of-view. Dotted line is satellite orbit, 19–8.5–6–8.5–46 km is the ScanPol polarimeter FOV lengths along track, the grey square is the MSIP polarimeter FOV.

The ScanPol allows to measure the first three Stokes parameters I , Q and U of the solar light, which scattered by the atmospheric aerosols and Earth surface at about 200 viewing along-track directions between scan angles $+50^\circ$ and -60° degrees from nadir (see Fig. 1). The polarimeter is designed to acquire the spectral and polarimetric measurements simultaneously to minimize the instrumental stray polarization effects and effects of "false" polarizations due to a relative motion of the scene in the image at the focal plane of the instrument. Polarization–intensity scanning of the ScanPol is achieved by the use of a two-mirror assembly with the aluminum mirrors oriented in the way when any polarization introduced at the first reflection is compensated for by the second reflection similar to APS/Glory instrument (Mishchenko et al., 2007). In Fig. 2 the optical layout of the ScanPol polarimeter is shown.

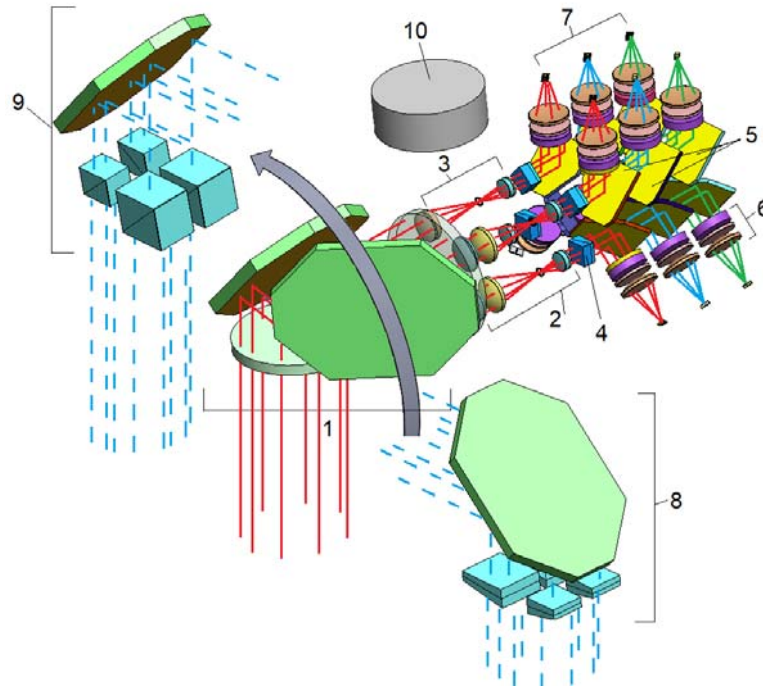


Fig. 2. ScanPol polarimeter optical layout: (1) polarization compensated scan mirrors assembly; (2) input lens and collimator of the NUV–VIS spectral channel; (3) input lens and collimator of the NIR spectral channel, (4) Wollaston prisms; (5) dichroic mirrors; (6) camera lens and interference filters for spectral channels; (7) the NUV–VIS and SWIR sensors; (8) quartz wedge depolarizers; (9) Glan prisms polarizer; (10) black body.

Since the design of the ScanPol polarimeter is partially based on the RSP and APS/Glory scanning polarimeters concept (Cairns et al., 1999; Peralta et al., 2007), the some peculiarities of the polarimetric model and calibration procedure are similar to all three instruments.

The minimum set of the retrieval requirements for the ScanPol polarimeter is used, which has been formulated and discussed in Mishchenko and Travis (1997), and Mishchenko et al. (2004, 2007a).

2.2. Multi-spectral imaging polarimeter

The MSIP instrument is the multispectral wide-angle imaging polarimeter, which as a part of the Aerosol-UA space mission will provide collection of images on the state of the atmosphere and surface in the scene, where the ScanPol polarimeter scans (see Fig. 1). The concept and details of the MSIP imaging polarimeter optical layout design has been proposed by (Sinyavskii et al., 2013).

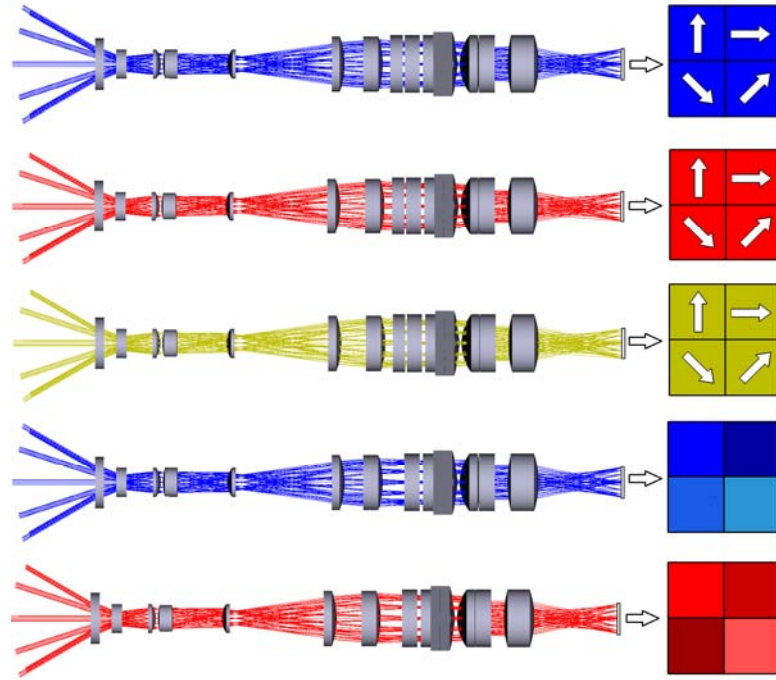


Fig. 3. Optical layout concept for the MSIP imaging polarimeter: the light path in five optical units and field-of-view of the MSIP polarimeter: the three polarimetric optical units with white arrows, which show polarization directions of polarizer film 0° , 90° , 45° , 135° , and the two intensity optical units are shown.

The MSIP consists of five optical units with the wide-angle field-of-view (FOV) $60^\circ \times 60^\circ$ in nadir along and across satellite path (Fig. 1). Three optical units are polarizing and two are photometric. The polarizing units allow to measure Stokes parameters I , Q and U at central wavelengths 410, 555, and 865 nm with the spectral full width at half maximum (FWHM) 20 nm. Two photometric units of the MSIP will serve to obtain the scene in eight spectral wavebands to retrieve the aerosol optical depth. The first photometric unit has central wavelengths 410, 443, 470, and 490 nm with spectral FWHM 20 nm, and the second photometric unit has central wavelengths 555, 670, and 865 nm with spectral FWHM 20 nm, and 910 nm with spectral FWHM 40 nm.

The image-separation system of the MSIP provides separation of the initial input image to four equal images that are analyzed by four film polarizers with azimuths 0° , 90° , 45° , and 135° . The camera lens direction the separated images to four different square areas of the single image sensor. These four images are the initial data for retrieving the first three Stokes vector components. Therefore, the MSIP polarimeter allows measuring the first three Stokes vector components simultaneously in the wide field-of-view.

The MSIP polarimeter spatial resolution is 6 km in the projection on the Earth surface in nadir, which corresponds to the instantaneous field-of-view of the ScanPol polarimeter. The number of phase angles for measuring of the single observation scene is at least 15.

2.3. Stokes-Mueller formalism

To describe polarization systems of the ScanPol and the MSIP polarimeters we apply self-consistent way by using the Stokes-Mueller formalism (Chipman et al., 2018). The retrieved Stokes parameters I , Q , U are elements of the Stokes vector $\mathbf{S}$:

$$\mathbf{S} = (I, Q, U, V) = (I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I_{45^\circ} + I_{135^\circ}, I_{0^\circ} - I_{90^\circ}, I_{45^\circ} - I_{135^\circ}, I_R - I_L)$$

where values I_i ($i = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$) are intensities passed through the linear polarizers, I_R, I_L are intensities passed through the circular right and left polarizers.

The design of the ScanPol and the MSIP polarimeters does not involve the measurement of circularly polarized light (V Stokes parameter). The circular polarization component of atmospheric scattering is typically at least two orders of magnitude smaller than the linear polarization (Waquet et al., 2009), and has no effect on aerosol parameters retrieved from polarimetric data. Commonly used polarization parameters are p , degree of linear polarization (DoLP), and θ , azimuth of the linear polarization in scene plane (AoLP):

$$\text{DoLP} = p = \sqrt{q^2 + u^2}, \text{AoLP} = \theta = \frac{1}{2} \arctan(u / q),$$

where $q=Q/I$ and $u=U/I$ are normalized Stokes parameters of incoming light. The reference axis considered to derive the Stokes vector components is linked to the scene plane.

Another useful form of equation defines Stokes parameters I, Q, U of partially linear polarized light via p and θ as below:

$$\mathbf{S} = (I, I p \cos(2\theta), I p \sin(2\theta), 0) \quad (1)$$

The ScanPol polarimeter uses a pair of crossed mirrors to scan the field-of-view. Then the light enters into refractive telescopes before being analyzed by the Wollaston prisms. The MSIP imaging polarimeter doesn't include the mirror scan system so the light enters straight into the telescopes and then analyzed by the polarizer film set.

In order to characterize how the instruments modify the incoming Stokes vector before being acquired by the detector, it is necessary to model the polarization sensitivity of the ScanPol and MSIP instruments.

3. ScanPol calibration models

3.1. Modeling

The ScanPol scan mirrors mismatching is expected as a primary source instrumental polarization. The telescope errors can also add retardance caused by stress in the telescope lense. The Wollaston prism performance can be perfect and will not impact the ScanPol polarising parameters quality. However, for simplicity, the depolarization effects are considered as the factor of the polarizer quality errors (Cairns and Geogdzhayev, 2010). The following Mueller matrices $\mathbf{M}_{TSM}$, $\mathbf{M}_T$ and $\mathbf{M}_A$ are introduced for the ScanPol instrument description. Index TSM means "two scan mirrors", T is "telescope"; A is Wollaston prism as "analyzer"; M is "mirror". The Mueller matrix $\mathbf{M}_{TSM}$ for the crossed scan mirrors in an arbitrary frame α_M is:

$$\mathbf{M}_{TSM} = \begin{pmatrix} A & \cos(2\alpha_M)B & \sin(2\alpha_M)B & 0 \\ -\cos(2\alpha_M)B & -\cos^2(2\alpha_M)A - \sin^2(2\alpha_M)\cos(\delta_{ps1} - \delta_{ps2}) & \cos(2\alpha_M)\sin(2\alpha_M)(\cos(\delta_{ps1} - \delta_{ps2}) - A) & \sin(2\alpha_M)\sin(\delta_{ps2} - \delta_{ps1}) \\ -\sin(2\alpha_M)B & \cos(2\alpha_M)\sin(2\alpha_M)(\cos(\delta_{ps1} - \delta_{ps2}) - A) & -\sin^2(2\alpha_M)A - \cos^2(2\alpha_M)\cos(\delta_{ps1} - \delta_{ps2}) & -\cos(2\alpha_M)\sin(\delta_{ps2} - \delta_{ps1}) \\ 0 & \sin(2\alpha_M)\sin(\delta_{ps1} - \delta_{ps2}) & -\cos(2\alpha_M)\sin(\delta_{ps1} - \delta_{ps2}) & \cos(\delta_{ps2} - \delta_{ps1}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{where } A = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{ps1}}{R_{ps2}} + \frac{R_{ps2}}{R_{ps1}} \right), \quad B = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{ps1}}{R_{ps2}} - \frac{R_{ps2}}{R_{ps1}} \right), \quad R_{ps1} = \frac{R_{p1}}{R_{s1}}, \quad R_{ps2} = \frac{R_{p2}}{R_{s2}},$$

$\delta_{ps1} = \delta_{p1} - \delta_{s1}$, $\delta_{ps2} = \delta_{p2} - \delta_{s2}$; $R_p = |r_p|^2$, $R_s = |r_s|^2$, $\delta_p = \arg(r_p)$, $\delta_s = \arg(r_s)$, r_p, r_s are complex reflection coefficients of the scan mirror for light polarized in the plane (p -polarization) and normal to the plane of incidence (s -polarization). Subscripts 1 and 2 in equation (2) refer to the first and to the second scan mirrors, respectively.

The Mueller matrix $\mathbf{M}_T$ for a retarder, which models here the telescopes polarization behavior, with the phase shift δ_T in an arbitrary orientation of anisotropy axis α_T is:

$$\mathbf{M}_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\alpha_T) + \sin^2(2\alpha_T)\cos(\delta_T) & \cos(2\alpha_T)\sin(2\alpha_T)(1 - \cos(\delta_T)) & \sin(2\alpha_T)\sin(\delta_T) \\ 0 & \cos(2\alpha_T)\sin(2\alpha_T)(1 - \cos(\delta_T)) & \sin^2(2\alpha_T) + \cos^2(2\alpha_T)\cos(\delta_T) & -\cos(2\alpha_T)\sin(\delta_T) \\ 0 & -\sin(2\alpha_T)\sin(\delta_T) & \cos(2\alpha_T)\sin(\delta_T) & \cos(\delta_T) \end{pmatrix} \quad (3)$$

and $\mathbf{M}_A$ for a polarizer (describes Wollaston prisms, that are also analyzers) with extinction ratio $1/e$ in an arbitrary orientation α_A the equation is:

$$\mathbf{M}_A = \frac{1+e}{2} \begin{pmatrix} 1 & \frac{1-e}{1+e}\cos(2\alpha_A) & \frac{1-e}{1+e}\sin(2\alpha_A) & 0 \\ \frac{1-e}{1+e}\cos(2\alpha_A) & \cos^2(2\alpha_A) + 2\frac{\sqrt{e}}{1+e}\sin^2(2\alpha_A) & \frac{(1-\sqrt{e})^2}{1+e}\cos(\alpha_A)\sin(\alpha_A) & 0 \\ \frac{1-e}{1+e}\sin(2\alpha_A) & \frac{(1-\sqrt{e})^2}{1+e}\cos(2\alpha_A)\sin(2\alpha_A) & 2\frac{\sqrt{e}}{1+e}\cos^2(\alpha_A) + \sin^2(\alpha_A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\frac{\sqrt{e}}{1+e} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Here: $e = \frac{t_{\perp}}{t_{\parallel}}$ is ratio of polarizer's transmissions for input light with linear polarization

crossed and parallel to polarizer's axis, the parameter that has the inverse value of the extinction ratio.

The polarimetric model for the ScanPol polarimeter is considered on the example of the one spectral channel equivalent polarization scheme, which includes two telescopes (T1, T2), two Wollaston prisms (W1, W2). Telescopes T1 and T2 have the same field-of-view and are used to divide the input beam into two new copies of one. These beam's copies then analyzed by two Wollaston prisms W1 and W2, which polarization azimuths are at 45° to each other, i.e. the Wollaston prism acts as parallel pair of analyzers, which azimuths are perpendicular. Thus, supposing the azimuth of Wollaston prisms W1 is equal 0° , the pair of telescopes T1 and T2, and pair of Wollaston prisms W1 and W2 divide an initial light beam spatially into two pairs of orthogonally polarised intensity signals R_{0° and R_{90° , R_{45° and R_{135° , which registered by four sensors (see Fig. 4).

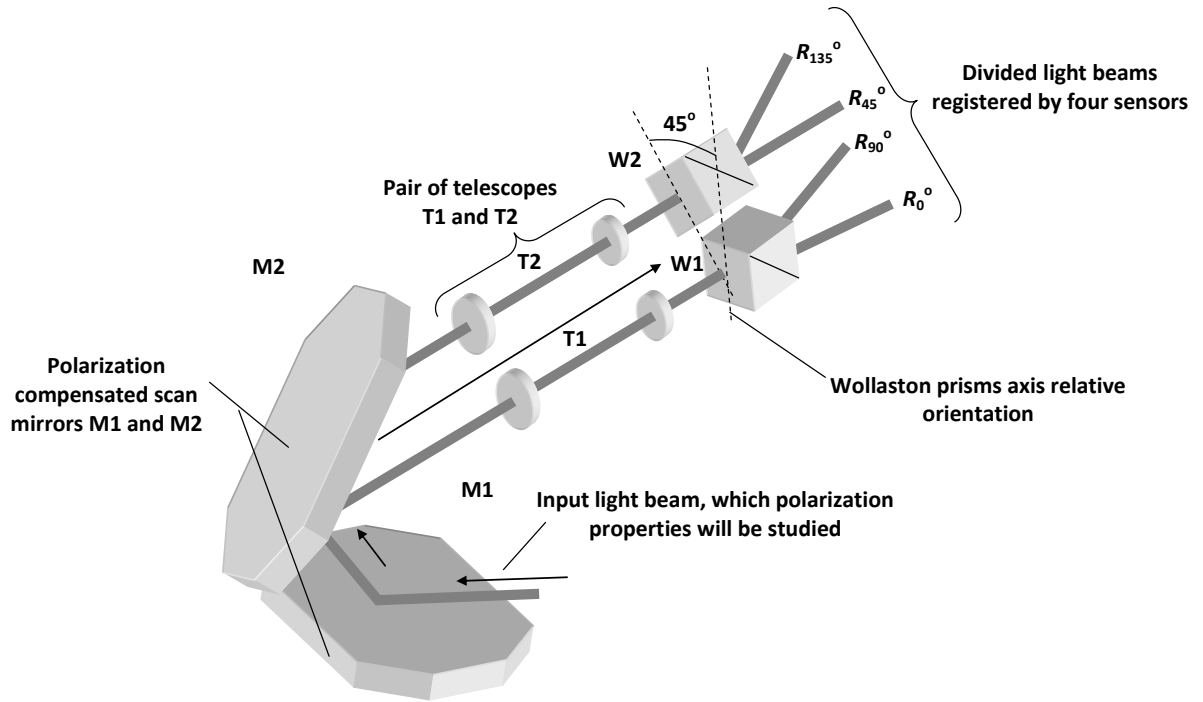


Fig. 4. Equivalent polarization scheme of the ScanPol polarimeter single spectral channel: scan mirrors M1 and M2, telescopes T1 and T2, Wollaston prisms W1 and W2, intensity signals R_0° , R_{90° , R_{45° and R_{135° , which are initial data for Stokes parameters calculation.

The instrumental polarization errors include possible clocking offset of Wollastone prisms, finite extinction ratios of prisms, polarization errors of the telescopes and different gain of the intensity pass divided light beams. The measured raw signal R from ScanPol sensors (Fig. 2) of the single spectral channel can be described in general by equation (see Fig. 4):

$$R = A_r K \left[\mathbf{M}_A(e, \alpha_A + \varepsilon) \cdot \mathbf{M}_T(\delta_T, \alpha_T) \cdot \mathbf{M}_{TSM}(R_{ps1}, R_{ps2}, \delta_{ps1}, \delta_{ps2}, \alpha_M) \cdot \mathbf{S}_{scene} \right]_0 + D, \quad (5)$$

where D is the dark reference signal for no incoming light; $\mathbf{S}_{scene}$ is Stokes vector for polarization of input scene, $\mathbf{M}$ are Mueller matrices of corresponding optical elements ($\mathbf{M}_A$ is for the Wollaston prism; $\mathbf{M}_T$ is for telescope; $\mathbf{M}_{TSM}$ is for scan mirrors); K is scalar value that describes isotropic gain of the of the given light path; A_r is radiometric calibration coefficient that converts a measured signals into absolute intensity scale; ε is clocking offset of Wollaston prism. The index "0" in equations (5) and (10) refers to the first Stokes parameter I . All other terms in equation (5) and their physical meaning are explained above after equations (2) – (4).

Since the K values are different for different outputs of Wollaston prisms (different light paths in Fig. 4) in general, the calibration coefficient A_r is the same for all output signals R for fixed wavelength.

The approximated equations, which connects the raw signal R_0° , R_{90° , R_{45° , R_{135° from the four ScanPol sensors (see Fig. 4) with the incoming light polarization from the scene (i.e. retrieved Stokes parameters q and u), are:

$$\frac{RD_{0^\circ} - K1 \cdot RD_{90^\circ}}{RD_{0^\circ} + K1 \cdot RD_{90^\circ}} = \frac{a_q^{-1} [(-q + q_{inst}) \cos(2\varepsilon_1) + (-u + u_{inst}) \sin(2\varepsilon_1)]}{1 + q_{inst}q + u_{inst}u}$$

$$\frac{RD_{45^\circ} - K2 \cdot RD_{135^\circ}}{RD_{45^\circ} + K2 \cdot RD_{135^\circ}} = \frac{a_u^{-1} [(-q + q_{inst}) \sin(2\varepsilon_2) + (-u + u_{inst}) \cos(2\varepsilon_2)]}{1 + q_{inst}q + u_{inst}u} \quad (6)$$

In equations (6) the subscript indices 0° , 90° , 45° and 135° correspond to four light beams registered by four sensors; $D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ define the dark reference signal for no incoming light; $RD_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ} = R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ} - D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ are signals, corrected by dark reference value. For the ScanPol polarimeter the values $K1$, $K2$ are intra-telescope calibration factors that equalize non-polarized input responses:

$$K1 = \frac{(RD_{0^\circ})}{(RD_{90^\circ})}, \quad K2 = \frac{(RD_{45^\circ})}{(RD_{135^\circ})} \quad (7)$$

ε_1 and ε_2 are clocking offsets of Wollaston prism from the exact angle position ($0^\circ + \varepsilon_1$, $90^\circ + \varepsilon_1$, $45^\circ + \varepsilon_2$, $135^\circ + \varepsilon_2$); q_{inst} , u_{inst} are the stray light instrumental polarisation Stokes parameters, which appears for non-polarized input light; a_q , a_u are polarization scaling factors that includes stray instrumental depolarization of light due to the polarizer, telescopes, and mirrors errors:

$$a_q = \frac{1 + e_1}{1 - e_1}, \quad a_u = \frac{1 + e_2}{1 - e_2} \quad (8)$$

where $1/e_1$, $1/e_2$ are Wollaston prism extinction ratios.

The retrieved Stokes parameters q and u can be calculated from Eq. (6) in two ways: first, by iterations as described in equations (26) – (29) in (Cairns and Geogdzhayev, 2010); second, without iteration using the accurate approximation according to equations:

$$q = \frac{q_{inst}s_2(s_1 + u_{inst}\Delta I_{0^\circ-90^\circ}) - (1 + u_{inst}^2)(c_2\Delta I_{0^\circ-90^\circ} - s_1\Delta I_{45^\circ-135^\circ}) + c_1q_{inst}(c_2 + u_{inst}\Delta I_{45^\circ-135^\circ})}{s_1s_2 + c_1c_2 + (c_2q_{inst} + s_2u_{inst})\Delta I_{0^\circ-90^\circ} + (c_1u_{inst} - s_1q_{inst})\Delta I_{45^\circ-135^\circ}}$$

$$u = \frac{u_{inst}c_2(c_1 + q_{inst}\Delta I_{0^\circ-90^\circ}) - (1 + q_{inst}^2)(s_2\Delta I_{0^\circ-90^\circ} + c_1\Delta I_{45^\circ-135^\circ}) + s_1u_{inst}(s_2 - q_{inst}\Delta I_{45^\circ-135^\circ})}{s_1s_2 + c_1c_2 + (c_2q_{inst} + s_2u_{inst})\Delta I_{0^\circ-90^\circ} + (c_1u_{inst} - s_1q_{inst})\Delta I_{45^\circ-135^\circ}} \quad (9)$$

where:

$$c_{1,2} = \cos(\varepsilon_{1,2}), \quad s_{1,2} = \sin(\varepsilon_{1,2}), \quad \Delta I_{0^\circ-90^\circ} = \frac{RD_{0^\circ} - K1 \cdot RD_{90^\circ}}{RD_{0^\circ} + K1 \cdot RD_{90^\circ}} a_q, \quad \Delta I_{45^\circ-135^\circ} = \frac{RD_{45^\circ} - K2 \cdot RD_{135^\circ}}{RD_{45^\circ} + K2 \cdot RD_{135^\circ}} a_u.$$

In equations (6) – (9), indexes 1 and 2 refer to the two parallel light paths. First includes telescope T1 and the Wollaston prism W1 and second one – telescope T2 and the Wollaston prism W2 respectively.

Therefore, the Stokes parameters characterizing the scene can be retrieved for input light from equations (9) after determination of the calibration coefficients for the ScanPol instrument spectral channels.

3.2. Ground-based calibration approach

The ground-based polarimetric calibration of the ScanPol polarimeter has been developed using two stages. At the first stage, the static part of the ScanPol polarimeter, without the scan mirrors, is calibrated. It is supposed that the linear polarized light with the highest DoLP and the periodically variable AoLP is used as input signal for calibration. This configuration is described by equation (5) when matrix of the scan mirrors assembly $\mathbf{M}_{TSM}$ is excluded. In that case, the general equation for the zero compensated four signals in all four paths is given by:

$$\begin{aligned} RD(t) &= A_r K \cdot \left[\mathbf{M}_A(e, \alpha_A + \varepsilon) \cdot \mathbf{M}_T(\delta_T, \alpha_T) \cdot \begin{bmatrix} I & Q & U & 0 \end{bmatrix}^T \right]_0 = \\ &= A_r IK (p/a) \left[q \left[\cos(2(\alpha_A + \varepsilon)) \left[(\cos(\delta_T) - 1) \sin^2(2\alpha_T) + 1 \right] - \frac{1}{2} \sin(2(\alpha_A + \varepsilon)) \sin(4\alpha_T) (\cos(\delta_T) - 1) \right] + \right. \\ &\quad \left. + u \left[\sin(2(\alpha_A + \varepsilon)) \left[(\cos(\delta_T) - 1) \cos^2(2\alpha_T) + 1 \right] - \frac{1}{2} \cos(2(\alpha_A + \varepsilon)) \sin(4\alpha_T) (\cos(\delta_T) - 1) \right] \right] + A_r IK \end{aligned} \quad (10)$$

where a is polarization scaling factors (a_q, a_u), p is the actual DoLP value of the input polarization and q, u are the actual normalized Stokes parameters of the complete linear input polarization with variable AoLP value ($\theta = \Omega t$), i.e. are equal $q = \cos(2\Omega t)$ and $u = \sin(2\Omega t)$. The value I is an intensity of input signal. Equation (10) can be transformed as:

$$\begin{aligned} RD(t) &= A_r IK + A_r IK (p/a) [\cos(2\Omega t)B + \sin(2\Omega t)C] = \\ &= A_r IK + A_r IK (p/a) p_{AT} (\cos(2\Omega t) \cos(2\alpha_{AT}) + \sin(2\Omega t) \sin(2\alpha_{AT})) \end{aligned} \quad (11)$$

where

$$\begin{aligned} B &= \cos(2(\alpha_A + \varepsilon)) \left[(\cos(\delta_T) - 1) \sin^2(2\alpha_T) + 1 \right] - \frac{1}{2} \sin(2(\alpha_A + \varepsilon)) \sin(4\alpha_T) (\cos(\delta_T) - 1) \\ C &= \sin(2(\alpha_A + \varepsilon)) \left[(\cos(\delta_T) - 1) \cos^2(2\alpha_T) + 1 \right] - \frac{1}{2} \cos(2(\alpha_A + \varepsilon)) \sin(4\alpha_T) (\cos(\delta_T) - 1) \quad (12) \\ p_{AT} &= \sqrt{B^2 + C^2}; \quad \cos(2\alpha_{AT}) = B / \sqrt{B^2 + C^2}; \quad \sin(2\alpha_{AT}) = C / \sqrt{B^2 + C^2}; \end{aligned}$$

In equation (12) the parameter p_{AT} is an additional depolarization introduced by the birefringent telescope and due to Wollaston prism clocking offset. Index AT refers to multiplied Wollaston prism and telescope depolarization.

Equation (11) describes equivalently the case when the signal $RD(t)$ is an output of linear polarizer with effective depolarization scale factor $a' = a/pp_{AT}$, clocking offset $\varepsilon' = \alpha_{AT} - \alpha_A$ when the complete linear polarized light with Stokes parameters $q = \cos(2\Omega t)$ and $u = \sin(2\Omega t)$ is an input. Replacing parameter $\alpha_{AT} = \alpha_A + \varepsilon'$, equation (10) is transformed to:

$$RD(t) = A_r IK + A_r IK a'^{-1} [\cos(2\Omega t) \cos(2(\alpha_A + \varepsilon')) + \sin(2\Omega t) \sin(2(\alpha_A + \varepsilon'))] \quad (13)$$

Note that equation (13) is written in form of the Fourier series, where $a_0 = A_r IK$ is the zero harmonic value. The values of second harmonics by cosine and sine are $a_2 = A_r IK a'^{-1} \cos(2(\alpha_A + \varepsilon'))$ and $b_2 = A_r IK a'^{-1} \sin(2(\alpha_A + \varepsilon'))$. To determine the mentioned calibration parameters for all intensity paths, the appropriate harmonics values are used:

$$\alpha_A + \varepsilon' = \frac{1}{2} \arctan(b_2 / a_2); \quad a'^{-1} = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} / a_0; \quad (14)$$

Eq. (13) is most simple and general. However, it describes completely how an intensity of input linear polarized light is transformed in all light paths of the ScanPol polarimeter. To avoid all possible misunderstanding, the concrete form of Eq. (13) for each of $RD_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ signals at output of Wollaston prisms is given as:

$$\begin{aligned}
RD_{0^\circ}(t) &= A_r IK_{0^\circ} + A_r IK_{0^\circ} a_q'^{-1} [\cos(2\Omega t) \cos(2(0^\circ + \varepsilon_1')) + \sin(2\Omega t) \sin(2(0^\circ + \varepsilon_1'))], \\
RD_{90^\circ}(t) &= A_r IK_{90^\circ} + A_r IK_{90^\circ} a_q'^{-1} [\cos(2\Omega t) \cos(2(90^\circ + \varepsilon_1')) + \sin(2\Omega t) \sin(2(90^\circ + \varepsilon_1'))], \\
RD_{45^\circ}(t) &= A_r IK_{45^\circ} + A_r IK_{45^\circ} a_u'^{-1} [\cos(2\Omega t) \cos(2(45^\circ + \varepsilon_2')) + \sin(2\Omega t) \sin(2(45^\circ + \varepsilon_2'))], \\
RD_{135^\circ}(t) &= A_r IK_{135^\circ} + A_r IK_{135^\circ} a_u'^{-1} [\cos(2\Omega t) \cos(2(135^\circ + \varepsilon_2')) + \sin(2\Omega t) \sin(2(135^\circ + \varepsilon_2'))]
\end{aligned}$$

where the subscript indices 0° , 90° , 45° and 135° correspond to four light beams registered by four sensors; indices 1 and 2 refer to telescope T1 (Wollaston prism W1) and telescope T2 (Wollaston prism W2) respectively (see Fig. 3); parameters $K_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ directly connected with $K1$ and $K2$ in equations (6) and (9) as $K1 = K_{0^\circ} / K_{90^\circ}$, $K2 = K_{45^\circ} / K_{135^\circ}$.

The obvious way to determine the isotropic gain coefficient K is to use the non-polarized light source. Since the Stokes parameters q and u are zero in this case, the values $K1$, $K2$ and inter-telescopes gain difference $C12$ are determined as relation of the corresponding signals at the output of the Wollaston prisms:

$$K1 = RD_{0^\circ} / RD_{90^\circ}; K2 = RD_{45^\circ} / RD_{135^\circ}; C12 = RD_{0^\circ} / RD_{45^\circ}. \quad (15)$$

Without using the non-polarized light source, the second way to determine K values is the calculation of the relations of zero harmonics in the different light beam paths:

$$K1 = a_{0(0^\circ)} / a_{0(90^\circ)}; K2 = a_{0(45^\circ)} / a_{0(135^\circ)}; C12 = a_{0(0^\circ)} / a_{0(45^\circ)}, \quad (16)$$

where the parameter $C12$ is inter-telescopes gain differences.

In that way, the static part of the ScanPol instrument has been calibrated. The second stage of calibration is the inclusion in the model the scan mirrors.

The model for the Stokes vector parameters (I', Q', U', V') , that arrives at the telescopes and are partially modified due to mismatches in scan mirrors, is applied in the form described in (Cairns and Geogdzhayev, 2010):

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I + q_{inst} Q + u_{inst} U \\ I q_{inst} - Q \\ I u_{inst} - U \\ V' \end{bmatrix} \quad (17)$$

In Eq. (17) parameters (I, Q, U, V) are actual Stokes parameters to be retrieved. The parameters, which have to be determined, are q_{inst} and u_{inst} that are approximately equal to elements $m_{12} = \cos(2\alpha_M)B$ and $m_{13} = \sin(2\alpha_M)B$ of normalized Mueller matrix of scan mirrors (see Eq. (2) for $\mathbf{M}_{TSM}$). From Eq. (17), the instrumental parameters q_{inst} and u_{inst} are the Stokes parameters at output of the scan mirrors assembly for non-polarized incoming light. Therefore, they can be measured accurately by the calibrated part of the polarimeter.

It can be shown that the arbitrary polarization instrumental imperfection of the ScanPol polarimeter can be corrected precisely by applying approach, which is used above to compensate the telescopes imperfection. For example, the arbitrary polarization due to the instrumental imperfections of the ScanPol polarimeter can be reduced using the new effective parameters a_{1-4}'' , ε_{1-4}'' and the new effective gain values $K1'$, $K2'$. There is no need to define any instrumental polarizations, which is the significant advantage of that approach. However, all calibration

parameters will be the function of the prism, telescope and mirror imperfections, and will be different for all intensity channels that are disadvantage of the approach. Therefore, the orbital calibration of the ScanPol polarimeter becomes more complicated, since the number of the reference units at the orbit is restricted to one depolarizer (non-polarized reference assemble, one per telescope) and one prism polarizer with fixed orientation (polarized reference assemble, one per telescope).

3.3. In-orbit calibration approach

Orbital calibration procedure of the ScanPol polarimeter is based on the APS/Glory approach described in (Cairns and Geogdzhayev, 2010). The orbital calibration is provided using the reference units that have installed inside the ScanPol instrument, which is shown in Fig. 5. The depolarizer unit contains the quartz wedge depolarizers, which guarantees the non-polarized with zero DoLP value reference light at the input window of the ScanPol. The dark unit is the dark chamber with the light adsorbing coating to set the zero level bias for the registering electronics of the ScanPol. The solar unit is the scattering diffuse plate with the well-known bidirectional reflectance distribution function (BRDF), which is used for the radiometric calibration of the ScanPol intensity paths. The polarizer unit is a set of four Glan prism polarizers with the fixed well-known orientation. The polarizer unit produces the light with the linear polarization of high DoLP value and well-known AoLP value. The scan mirrors are rotated and guide the scattered light from the nadir direction, which transmitted through and scattered from the reference samples to the ScanPol polarimeter measurement channels with axes that are perpendicular to the plane of Fig. 5 and parallel to the axis of the scan mirrors rotation.

The sequence of the algorithm for orbital calibration of the ScanPol instrument is following. First, the mean value of “zero” signal is determined:

$$D_{\alpha_A} = \frac{\sum_{k=0}^i D_{\alpha_A(\beta_k)}}{(i-1)}, \quad (18)$$

where $D_{\alpha_A(\beta_k)}$ values are the dark reference signal for no incoming light when the scan mirrors “look” at the dark calibration unit at the angle β_k . The β_k angle is changed in the $\beta_0 \div \beta_i$ range when the SM look at extended dark unit (see the shaded sector in Fig. 5).

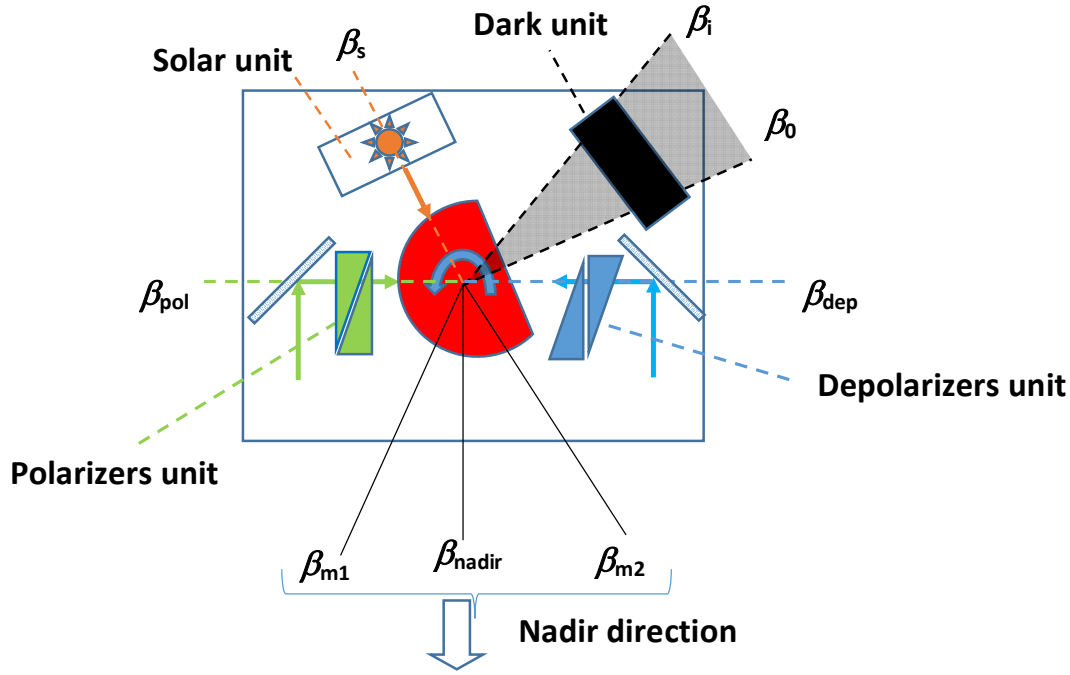


Fig. 5. The scan mirrors and calibration units layout of the ScanPol instrument: red segment is scan mirrors with rotation direction shown; blue element is quartz wedges of the depolarization unit seen at β_{dep} angle; green element is the Glan prism polarizer unit seen at β_{pol} angle, black element is the dark unit seen between β_0 and β_i angles; solar calibration unit seen at β_s angle. Scanning along-track directions between scan angle $\beta_{m1} = +50^\circ$ and $\beta_{m2} = -60^\circ$ from nadir (β_{nadir}).

Then all raw signals $R_{\alpha_A(\beta_k)}$, which obtained at the other SM direction angles, are corrected by averaged D_{α_A} from equation (18).

Second, the radiometric calibration coefficient A_r is calculated. This coefficient is retrieved from the signals detected by ScanPol at the time when the satellite platform after special manoeuvre is directed at the Sun (Moon). Then the sunlight (moonlight) of known intensity is scattered by the solar unit (see Fig. 5), whose BRDF is well defined. When the Wollaston prism output angle $\alpha_A = 0^\circ$ and the gain coefficient $K=1$ in equation (5), then from equation (13) $A_r = I_{sun} / RD_{0^\circ}$, where I_{sun} is the known absolute value of intensity.

Third, the calibration parameters $K1$ and $K2$ can be updated using the q_{inst} , u_{inst} and a'_q , a'_u , that are supposed to be stable. When the scan mirrors look at nadir through depolarizer unit (SM position β_{dep} , see Fig. 5) the values $q = 0$ and $u = 0$, therefore Eq. (6) is simplified to:

$$\begin{aligned} \frac{RD_{0^\circ} - K1 \cdot RD_{90^\circ}}{RD_{0^\circ} + K1 \cdot RD_{90^\circ}} &= a_q'^{-1} [q_{inst} \cos(2\varepsilon'_1) + u_{inst} \sin(2\varepsilon'_1)] \\ \frac{RD_{45^\circ} - K2 \cdot RD_{135^\circ}}{RD_{45^\circ} + K2 \cdot RD_{135^\circ}} &= a_u'^{-1} [-q_{inst} \sin(2\varepsilon'_2) + u_{inst} \cos(2\varepsilon'_2)] \end{aligned} \quad (19)$$

From Eq. (19) we obtain updated calibration coefficients $K1$ and $K2$:

$$K1 = \left(\frac{1 - a'_q q'_{inst}}{1 + a'_q q'_{inst}} \right) \frac{RD_{0^\circ}}{RD_{90^\circ}}; \quad K2 = \left(\frac{1 - a'_u u'_{inst}}{1 + a'_u u'_{inst}} \right) \frac{RD_{45^\circ}}{RD_{135^\circ}}; \quad (20)$$

where

$$\begin{aligned} q'_{inst} &= q_{inst} \cos(2\varepsilon'_1) + u_{inst} \sin(2\varepsilon'_1) \\ u'_{inst} &= -q_{inst} \sin(2\varepsilon'_2) + u_{inst} \cos(2\varepsilon'_2) \end{aligned} \quad (21)$$

Last, for the updating of the depolarization scaling factors a'_q and a'_u , we use the stable calibration coefficients $K1$ and $K2$. When the SM looks to nadir through polarizer unit (the MS position $-\beta_{pol}$, see Fig. 5), the incoming light polarization is linear with well-defined azimuths, which values are set during the laboratory pre-flight calibration procedure. Therefore, the Stokes parameters of the incoming light are known exactly. They are used as calibrated input q_{cal} and u_{cal} .

Substituting values q_{cal} and u_{cal} into Eq. (6), we can update factors a'_q and a'_u , knowing other calibration values:

$$a'_q = \frac{q'_{cal} + q'_{inst}}{RD_{0^0} - K1 \cdot RD_{90^0} (1 + q_{cal}q_{inst} + u_{cal}u_{inst})}; \quad a'_u = \frac{u'_{cal} + u'_{inst}}{RD_{45^0} - K2 \cdot RD_{135^0} (1 + q_{cal}q_{inst} + u_{cal}u_{inst})}; \quad (22)$$

where

$$\begin{aligned} q'_{cal} &= -q_{cal} \cos(2\varepsilon'_1) - u_{cal} \sin(2\varepsilon'_1) \\ u'_{cal} &= q_{cal} \sin(2\varepsilon'_2) - u_{cal} \cos(2\varepsilon'_2) \end{aligned} \quad (23)$$

To minimize and equalize the relative errors in updated a'_q and a'_u it is reasonable to use the calibrated polarization with comparable values of q_{cal} and u_{cal} . This condition is fulfilled for the AoLP value of 22.5° , which is the set angle for the reference Glan polarizers. Using calibrated parameters determined above, the retrieved Stokes parameters of scene q and u can be calculated from Eq. (9). The DoLP value is:

$$\text{DoLP} = p = \sqrt{q^2 + u^2} \quad (24)$$

Azimuth of linear polarization AoLP is:

$$\text{AoLP} = \theta_{real} = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{u}{q}\right) - \theta_{TSM}, \quad (25)$$

where $\theta_{TSM} = 90^\circ - \beta_{nadir}$ because the azimuth angle of polarization is rotated synchronously with rotation of the scan mirrors.

4. Multispectral imaging polarimeter MSIP calibration model

4.1. Multispectral imaging polarimeter modeling

The concept of the imaging polarimeter optical layout has been proposed by Sinyavskii et al. (2013). The design allows measuring the Stokes vector components simultaneously in wide-angle field-of-view by separation of the light paths into four images using set of prisms. The MSIP single polarimetric optical unit is shown in Fig. 6.

In the MSIP channel the four-sector polarizing film are placed providing polarization angles 0° , 90° , 45° and 135° (see Fig. 6 and Fig. 7). The system of the deflection prisms (achromatic in 420–850 nm spectral band) serves for separation of the input image to four images (see separation system (6) in Fig. 6 and Fig. 7). Camera lens creates the image of scene simultaneously in four

polarization directions at the sensor of one of the three spectral polarimetric units in the 420–850 nm spectral bands.

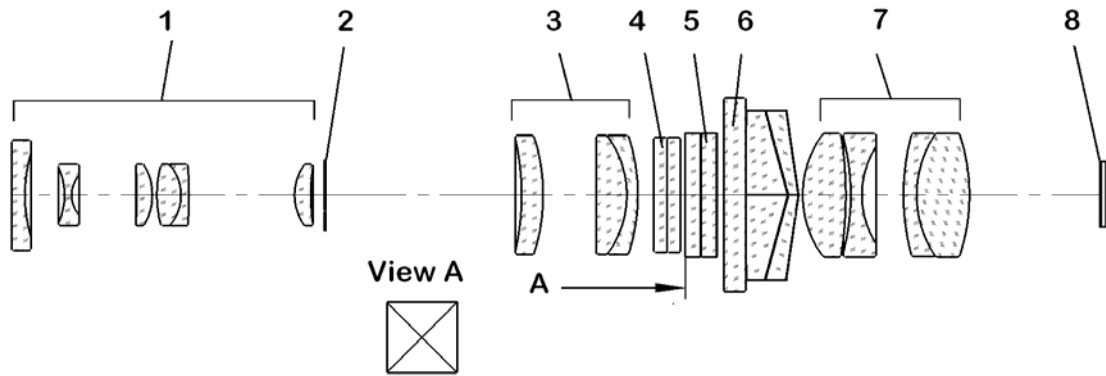


Fig. 6. The one optical polarimetric unit layout of the MSIP polarimeter. Letter A shows view to input window with four film sector polarizers: collimator (1), field-of-view aperture (2), collimator (3), the polarizing element composited from polarizing films (4), spectral band filter (5), prisms for separation the input image to four images (6), camera lens (7), and the image sensor (8).

In Fig. 7 the main elements of the MSIP optical polarimetric unit are shown, which influences quality of measurements of polarisation parameters p and θ in the scene image. The lenses of the telescope T (see Fig. 7) could have areas with stress that produce additional retardance. These instrumental errors are described by the Mueller matrix (see Eq. (3)) at each pixel (i, j) by phase shift $\delta_{T(i,j)}$ and orientation of anisotropy axes $\alpha_{T(i,j)}$. In further consideration the (i, j) indices are omitted meaning that all calculations are related to the separate pixel at the image sensor.

Next group of elements in Fig. 7 that impact quality of the polarisation scene retrievals are four polarizing films (analyzers). Each of the polarizing films A1÷A4 is described by the Mueller matrix (see equation (4)). Their azimuths α_A are approximately 0° , 90° , 45° , and 135° correspondingly with unknown clock offsets $\varepsilon_1 \div \varepsilon_4$

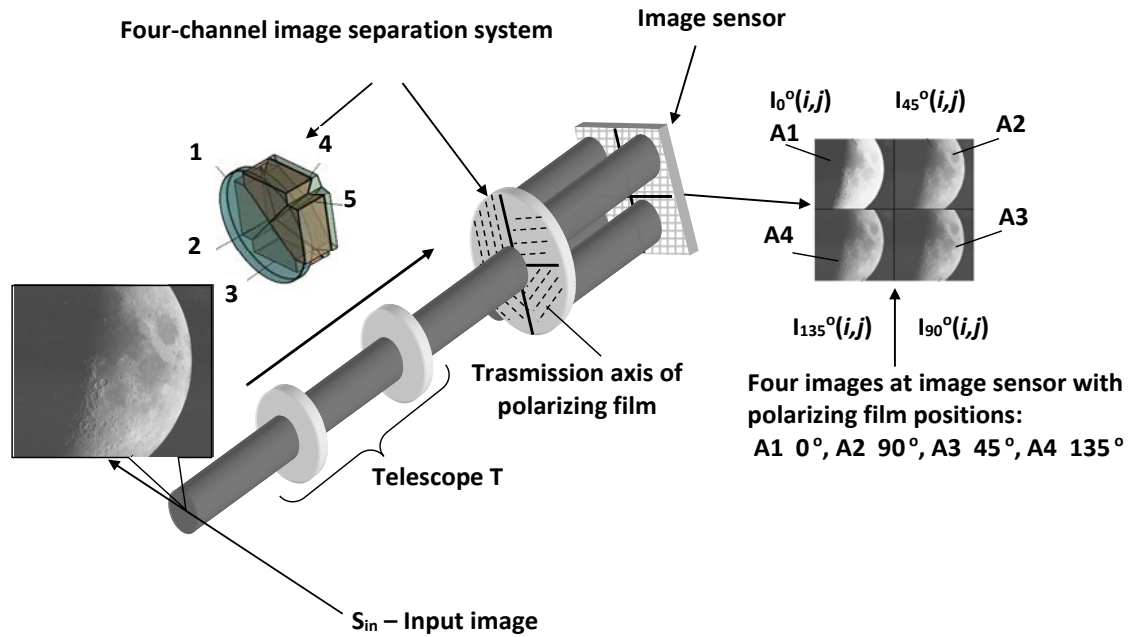


Fig. 7. The main elements of the one spectral polarisation unit of the MSIP polarimeter. Image separation system (at top left): (1) the base of separation unit, and (2–4) achromatic wedges for image separation into four images with different polarisations. Set of four images (at top right) with the position of polarizing element 0°, 90°, 45° and 135° in the areas A1, A2, A3, and A4 at the image sensor. Four real Moon images are shown in the four polarization angles as an example.

Similar to the ScanPol, the each of the MSIP beam paths can be characterized by different gain K . Values of dark reference signal D with no incoming light for sensor pixels could be different as well. The light intensity, which is received by specific pixel of the sensor in the beam path of the corresponded polarizing film, can be described as:

$$\begin{aligned}
 I_{0^\circ} &= A_r^{-1} \cdot (R_{0^\circ} - D_{0^\circ}), \\
 I_{90^\circ} &= (A_r K1)^{-1} \cdot (R_{90^\circ} - D_{90^\circ}), \\
 I_{45^\circ} &= (A_r K2)^{-1} \cdot (R_{45^\circ} - D_{45^\circ}), \\
 I_{135^\circ} &= (A_r K3)^{-1} \cdot (R_{135^\circ} - D_{135^\circ}).
 \end{aligned} \tag{26}$$

where $D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ is the dark reference signal for no incoming light at the pixel, measured for different beam paths; $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ are raw values of the measured signal; A_r is radiometric calibration coefficient for measured intensity; $K1 \div K3$ are the gain coefficients in the corresponded MSIP optical unit. For simplicity, the absolute radiometric calibration coefficient A_r of the MSIP polarimeter is provided only for the optical path with the orientation of the transmission axis 0° (in the area A1, see Fig. 7). For optical paths corresponded to the areas A2, A3, and A4 (Fig. 7), the gain factors $K1 \div K3$ will be determined relative to area A1. Then, if necessary, the signals of absolute intensity in these areas can be reconstructed by multiplying $K1 \div K3$ by A_r .

Considering polarization parameters of the MSIP optical paths (Fig. 7), the equations that

determine signals $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ for the input light polarization $\mathbf{S}_{scene}$ are given by:

$$\begin{aligned} R_{0^\circ} &= A_r \left[\mathbf{M}_{A1}(a_1, 0^\circ + \varepsilon_1) \cdot \mathbf{M}_{T1}(\delta_{T1}, \alpha_{T1}) \cdot \mathbf{S}_{scene} \right]_0 + D_{0^\circ}, \\ R_{90^\circ} &= A_r K1 \cdot \left[\mathbf{M}_{A2}(a_2, 90^\circ + \varepsilon_2) \cdot \mathbf{M}_{T2}(\delta_{T2}, \alpha_{T2}) \cdot \mathbf{S}_{scene} \right]_0 + D_{90^\circ}, \\ R_{45^\circ} &= A_r K2 \cdot \left[\mathbf{M}_{A3}(a_3, 45^\circ + \varepsilon_3) \cdot \mathbf{M}_{T3}(\delta_{T3}, \alpha_{T3}) \cdot \mathbf{S}_{scene} \right]_0 + D_{45^\circ}, \\ R_{135^\circ} &= A_r K3 \cdot \left[\mathbf{M}_{A4}(a_4, 135^\circ + \varepsilon_4) \cdot \mathbf{M}_{T4}(\delta_{T4}, \alpha_{T4}) \cdot \mathbf{S}_{scene} \right]_0 + D_{135^\circ}. \end{aligned} \quad (27)$$

Therefore, the parameters $K1 \div K3$, a_{1-4} , ε_{1-4} , δ_{T1-4} , α_{T1-4} should be determined to retrieve the required Stokes parameters I , Q , U , DoLP and AoLP. In equation (27) and below, the scale factor a is used instead of extinction ratio e as argument of the polarizer Mueller matrix, since it appears in the final equations. In addition, the telescope parameters in beam paths are separated to four independent considerations, because a spatial distribution of the telescope polarization parameters in the image system should be also taken into account.

4.2. Polarimetric calibration of the MSIP channels

The general expression for the light intensity at the output of the birefringent telescope and imperfect polarizer sequence was given above by Eq. (10) in Section 3.2. There was also demonstrated that the given element sequence affects the input light intensity as the single imperfect polarizer with some new effective azimuth α_{AT} and depolarization factor a' (see Section 3.2). The relationship of these effective parameters with the actual parameters α_T , δ_T , α_A , and a were described in equations (11) – (14). These effective parameters can be determined experimentally. The MSIP instrument ground-based calibration procedure includes determination of the dark reference signal for no incoming light $D_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$, radiometric calibration coefficient A_r , four sets of gain factors $K1 \div K3$, four offset factors ε'_{1-4} , and four depolarization factors a'_{1-4} . All of these factors correspond to each pixel of the input scene image.

Basically, the MSIP imager-polarimeter has four separated intensity channels with the different depolarization factors a'_{1-4} and offsets ε'_{1-4} . Therefore, we cannot use Eq. (6) (see Section 3.1) for retrieving of the Stokes parameters. However, the raw intensities after the film polarizers and the separation system are related to the input intensities as

$$\begin{aligned} RD_{0^\circ} &= A_r I \{1 + a_1'^{-1} [q \cos(2\varepsilon'_1) + u \sin(2\varepsilon'_1)]\}, \\ RD_{90^\circ} &= A_r K1 I \{1 - a_2'^{-1} [q \cos(2\varepsilon'_2) + u \sin(2\varepsilon'_2)]\}, \\ RD_{45^\circ} &= A_r K2 I \{1 - a_3'^{-1} [q \sin(2\varepsilon'_3) - u \cos(2\varepsilon'_3)]\}, \\ RD_{135^\circ} &= A_r K3 I \{1 + a_4'^{-1} [q \sin(2\varepsilon'_4) - u \cos(2\varepsilon'_4)]\} \end{aligned} \quad (28)$$

where $RD_{\alpha_A} = R_{\alpha_A} - D_{\alpha_A}$. The dark reference signal values D_{α_A} are retrieved using measurements when the aperture of the MSIP channel is closed.

The highly depolarized light source and rotated linear polarizer with extended homogeneous field (for example, the integrating sphere and high quality polarizing film that covers the MSIP field-of-view) is used to determine the offsets ε'_{1-4} and parameters depolarization factors a'_{1-4} . The

polarizer should overlap the MSIP polarimeter FOV. In this case, the signal at output of the MSIP polarimeter polarizers will be in general:

$$RD(t) = A_r K I \{1 + a'^{-1} [\cos(2\Omega t) \cos(2(\alpha_A + \varepsilon')) + \sin(2\Omega t) \sin(2(\alpha_A + \varepsilon'))]\} \quad (29)$$

Equation (29) is the similar for all pixels of the CCD matrix when instead of K , a' and ε' we introduce $A_{ri,j}$, $K1_{i,j} \div K3_{i,j}$, $a'_{1-4,i,j}$ and $\varepsilon'_{1-4,i,j}$, respectively, to specify the certain pixel of the CCD matrix. Instead of the parameter α_A , we insert 0° , 90° , 45° , or 135° angles for different film polarizers, respectively. According to Eq. (29) and similar to equations (13) – (15), the calibration parameter for each pixel can be assessed as:

$$\alpha_A + \varepsilon' = \frac{1}{2} \arctan(b_2 / a_2) - ; \quad a'^{-1} = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} / a_0 ; \quad (30)$$

$$K1 = a_{0(90^\circ)} / a_{0(0^\circ)} ; \quad K2 = a_{0(45^\circ)} / a_{0(0^\circ)} ; \quad K3 = a_{0(135^\circ)} / a_{0(0^\circ)} . \quad (31)$$

where $a_0 = A_r IK$ is the value of the Fourier series zero harmonic, and $a_2 = A_r IK a'^{-1} \cos(2(\alpha_A + \varepsilon'))$, $b_2 = A_r IK a'^{-1} \sin(2(\alpha_A + \varepsilon'))$ are the values of the second harmonics by cosine and sine correspondingly. Radiometric correction A_r should be determined in series of radiometric calibrations with non-polarized source with the well-known intensity.

The MSIP polarimeter has four separated intensity channels with different depolarization factors a'_{1-4} and different offsets ε'_{1-4} . To derive the new equations, equation (28) has been rewritten in the matrix form:

$$\begin{bmatrix} I_{0^\circ} \\ I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} \\ I_{135^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_1'^{-1} \cos(2\varepsilon'_1) & a_1'^{-1} \sin(2\varepsilon'_1) \\ 1 & -a_2'^{-1} \cos(2\varepsilon'_2) & -a_2'^{-1} \sin(2\varepsilon'_2) \\ 1 & -a_3'^{-1} \sin(2\varepsilon'_3) & a_3'^{-1} \cos(2\varepsilon'_3) \\ 1 & a_4'^{-1} \sin(2\varepsilon'_4) & -a_4'^{-1} \cos(2\varepsilon'_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} \quad (32)$$

where $I_{0^\circ} = RD_{0^\circ} / A_r$, $I_{90^\circ} = RD_{90^\circ} / A_r K1$, $I_{45^\circ} = RD_{45^\circ} / A_r K2$, $I_{135^\circ} = RD_{135^\circ} / A_r K3$.

Then the retrieving expressions are:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_1'^{-1} \cos(2\varepsilon'_1) & a_1'^{-1} \sin(2\varepsilon'_1) \\ 1 & -a_2'^{-1} \cos(2\varepsilon'_2) & -a_2'^{-1} \sin(2\varepsilon'_2) \\ 1 & -a_3'^{-1} \sin(2\varepsilon'_3) & a_3'^{-1} \cos(2\varepsilon'_3) \\ 1 & a_4'^{-1} \sin(2\varepsilon'_4) & -a_4'^{-1} \cos(2\varepsilon'_4) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_{0^\circ} \\ I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} \\ I_{135^\circ} \end{bmatrix} \quad (33)$$

In equation (33), the perfect matching of the four polarized images A1-A4 (see Fig. 7) is assumed. The ground-based calibration using the calibrated mesh field image will be applied to reduce possible geometrical mismatching between image pixels. The power (-1) upon the matrix of imperfections in the equation (33) determines pseudo inversion of the rectangular matrix. Equation (33) allows retrieving the absolute Stokes parameters by the least square approach. However, this equation is unsuitable to provide the intercalibration procedure. Therefore, it is reasonable to use the ScanPol and the MSIP polarimeters intercalibration for the further simplicity. Furthermore, given case is more fit to avoid the use of the absolute intensity and the radiometric calibration parameters.

There are no specific criteria to choose the specific pair of the raw data to build relations mentioned above. Moreover, all possible combination of the relations would be used to averaging the values of the normalized Stokes parameters. Below the one of the possible cases is considered. In particular, from Eq. (28) it is can be written:

$$\begin{aligned}\frac{RD_{0^\circ}}{RD_{90^\circ}} &= \frac{1}{K1} \frac{1 + a_1'^{-1}(q \cos(2\varepsilon_1') + u \sin(2\varepsilon_1'))}{1 - a_2'^{-1}(q \cos(2\varepsilon_2') + u \sin(2\varepsilon_2'))}, \\ \frac{RD_{45^\circ}}{RD_{135^\circ}} &= \frac{K2}{K3} \frac{1 - a_3'^{-1}(q \sin(2\varepsilon_3') - u \cos(2\varepsilon_3'))}{1 + a_4'^{-1}(q \sin(2\varepsilon_4') - u \cos(2\varepsilon_4'))}.\end{aligned}\quad (34)$$

or in matrix form:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \mathbf{B} \begin{pmatrix} q \\ u \end{pmatrix} \quad (35)$$

where

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{RD_{0^\circ}}{RD_{90^\circ}} - \frac{1}{K1} \\ \frac{RD_{45^\circ}}{RD_{135^\circ}} - \frac{K2}{K3} \end{pmatrix}; \\ \mathbf{B} &= \begin{pmatrix} a_1'^{-1}K1^{-1} \cos(2\varepsilon_1') + a_2'^{-1} \frac{RD_{0^\circ}}{RD_{90^\circ}} \cos(2\varepsilon_2') & a_1'^{-1}K1^{-1} \sin(2\varepsilon_1') + a_2'^{-1} \frac{RD_{0^\circ}}{RD_{90^\circ}} \sin(2\varepsilon_2') \\ -a_3'^{-1} \frac{K2}{K3} \sin(2\varepsilon_3') - a_4'^{-1} \frac{RD_{45^\circ}}{RD_{135^\circ}} \sin(2\varepsilon_4') & a_3'^{-1} \frac{K2}{K3} \cos(2\varepsilon_3') + a_4'^{-1} \frac{RD_{45^\circ}}{RD_{135^\circ}} \cos(2\varepsilon_4') \end{pmatrix}.\end{aligned}\quad (36)$$

The required Stokes parameters are found from Eq. (36) as:

$$\begin{pmatrix} q \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (37)$$

Equation (37) is the final equation for determination of the normalized Stokes polarization parameters of scene in the pixel area. The equation includes all calibration parameters described above and is a general equation for all pixels of the scene image where each parameter is the individual characteristic for image field in area of each specific pixel. From equation (28), the absolute value of the intensity as $I = RD_{0^\circ} / A_r \{1 + a_1'^{-1}[q \cos(2\varepsilon_1') + u \sin(2\varepsilon_1')]\}$ can be retrieved.

5. ScanPol and MSIP polarimeters intercalibration

The ScanPol polarimeter includes the calibration units, which provide control of the measurements reliability and specify several calibration parameters on orbit. However, the MSIP polarimeter has not included onboard calibration due to the technical difficulties to design calibration units for the MSIP. The both polarimeters are combined in single mechanical unit that adapted to the YuzhSat satellite platform (see Fig. 8).

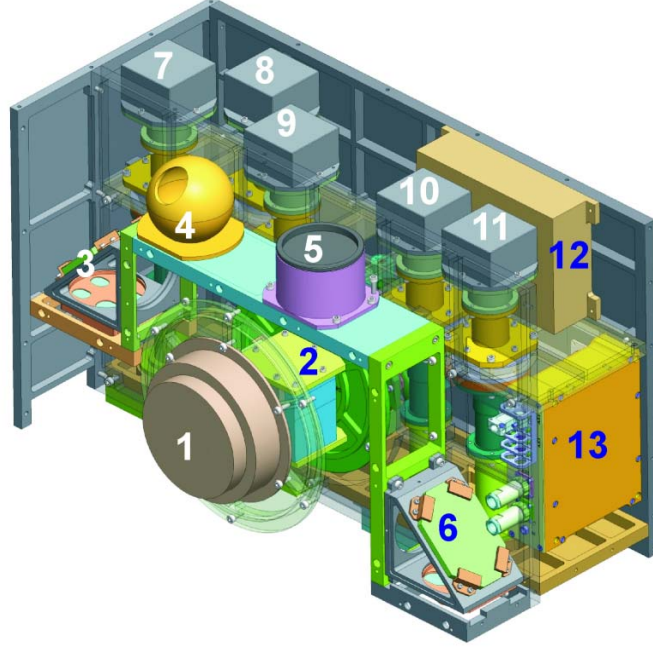


Fig. 8. The ScanPol and MSIP polarimeters combined in the single unit adapted to the YuzhSat microsatellite platform: (1) scan mirrors assembly, (2) ScanPol unit, (3) polarizer calibration unit, (4) photometric calibration unit, (5) dark unit (black body), (6) depolarizer calibration unit, (7–9) MSIP polarimetric units, (10–11) MSIP intensity units, and (12–13) interface units.

The FOVs of the ScanPol and MSIP polarimeters have the parts of the scene that are the same (see Fig. 1). This feature will be used for intercalibration of the MSIP on the orbit using the ScanPol data in the same parts of field-of-view.

For intercalibration, the two possible cases are considered. In the first case, we determine the parameters of the radiometric calibration and the gain factors A_r , $K1 \div K3$ when values D_{α_A} , a'_{1-4} and ε'_{1-4} are stable. In the second case, we calculate the depolarization factors a'_{1-4} when the gain parameters A_r , $K1 \div K3$, dark reference value D_{α_A} , and offsets ε'_{1-4} are stable. For the MSIP calibration, we need to know the precise calibrated values of absolute intensity I_{cal} and Stokes parameters q_{cal} and u_{cal} of scene that is observed by the MSIP polarimeter. These values are provided by the calibrated ScanPol measurements. Then, using Eq. (28), the MSIP polarimeter radiometric and gain factors can be obviously updated as:

$$A_r = \frac{RD_{0^\circ}}{I_{cal} \{1 + a_1'^{-1} [q_{cal} \cos(2\varepsilon_1') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_1')]\}};$$

$$K1 = \frac{RD_{90^\circ} \{1 + a_1'^{-1} [q_{cal} \cos(2\varepsilon_1') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_1')]\}}{RD_{0^\circ} \{1 - a_2'^{-1} [q_{cal} \cos(2\varepsilon_2') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_2')]\}},$$

$$K2 = \frac{RD_{45^\circ} \{1 + a_1'^{-1} [q_{cal} \cos(2\varepsilon_1') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_1')]\}}{RD_{0^\circ} \{1 - a_3'^{-1} [q_{cal} \sin(2\varepsilon_3') - u_{cal} \cos(2\varepsilon_3')]\}},$$

$$K3 = \frac{RD_{135^\circ}}{RD_{0^\circ}} \frac{\{1 + a_1'^{-1} [q_{cal} \cos(2\varepsilon_1') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_1')]\}}{\{1 + a_4'^{-1} [q_{cal} \sin(2\varepsilon_4') - u_{cal} \cos(2\varepsilon_4')]\}} \quad (38)$$

The corrections of the depolarization factors we obtain from Eq. (28) as:

$$\begin{aligned} \frac{I_{cal}(q_{cal} \cos(2\varepsilon_1') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_1'))}{RD_{0^\circ} / A_r - I_{cal}} &= a_1' ; \\ \frac{I_{cal}(q_{cal} \cos(2\varepsilon_2') + u_{cal} \sin(2\varepsilon_2'))}{RD_{90^\circ} / A_r K1 - I_{cal}} &= a_2' \\ \frac{I_{cal}(q_{cal} \sin(2\varepsilon_3') - u_{cal} \cos(2\varepsilon_3'))}{RD_{45^\circ} / A_r K2 - I_{cal}} &= a_3' \\ \frac{I_{cal}(q_{cal} \sin(2\varepsilon_4') - u_{cal} \cos(2\varepsilon_4'))}{RD_{135^\circ} / A_r K3 - I_{cal}} &= a_4' \end{aligned} \quad (39)$$

In Eq. (38) and (39) the intensity I_{cal} and Stokes parameters q_{cal} and u_{cal} are calibrated parameters provided by the ScanPol for the corresponding pixels of the MSIP image sensor.

6. Polarimetric calibration validation in the numerical experiment

The numerical experiments were performed to validate the ScanPol and MSIP polarimeters calibration procedure.

The model equation (5) is used for the ScanPol polarimeter calibration. The imperfections of the polarization properties of the scan mirrors, telescopes and polarization prisms of the ScanPol polarimeter are described by the parameters R_{ps1} / R_{ps2} , $\delta_{ps1} - \delta_{ps2}$, α_M , δ_T , α_T , ε and e , respectively. The isotropic gain/absorption in each optical channel is defined by the parameter K .

In the MSIP imaging polarimeter case the equation (10) was taken in consideration as a basic for all pixels' signals modelling. Thereby as imperfections of the MSIP polarimeter the only parameters δ_T , α_T , ε and e needed to be considered.

It is expected that all mentioned imperfections will have constant values or vary insignificantly at least during the one revolution of the scan mirrors. These parameters will be the source of systematic errors in determining the DoLP and AoLP values. Another source of errors in the polarimeters will be the noise of photodetectors, amplifiers and analog-to-digital converters, which obviously have a random nature. In the numerical experiments calculation, this source considered as a randomly generated additive term with amplitude ΔI .

Ideally, the scan mirrors are identical, the telescope lenses for both polarimeters are isotropic, the Wollaston prisms and polarizing films are precisely oriented and have infinite extinction ratios, the isotropic gain/absorption in all optical paths is equal within each spectral range and the random noise is absent. Then the imperfection values are: $R_{ps1} / R_{ps2} = 1$, $\delta_{ps1} - \delta_{ps2} = 0$, $\alpha_M = \text{indefinite}$, $\delta_T = 0$, $\alpha_T = \text{indefinite}$, $\varepsilon = 0$, $e = 0$, $\Delta I = 0$.

Preliminary measurement of the imperfections for the ScanPol polarimeter prototype and the MSIP polarimeter optical path parts allows estimates the upper limit of their values as:

$$\left| 1 - R_{ps1} / R_{ps2} \right| \leq 0.04, \left| \delta_{ps1} - \delta_{ps2} \right| \leq 2^\circ, \alpha_M \approx 1^\circ, \quad (40)$$

$$\delta_T \leq 5^\circ, \alpha_T \approx 10^\circ, \varepsilon \leq 5', e \leq 10^{-4}, \Delta I / I_{\max} \leq 10^{-4}.$$

where upper limit of parameter e taken in worst case of polarizing films in the MSIP polarimeter case.

Radiometric calibration coefficient A_r and the dark reference signals D_{α_A} were not assessed at this stage and their values assumed equal 1 and 0, respectively.

The following series of numerical experiments allowed to assess the errors Δp_{ret} and $\Delta \theta_{ret}$ in retrieved degree p_{ret} and angle θ_{ret} of input scene polarization when the uncalibrated ScanPol and MSIP polarimeters are used. During these experiments, the calculations of the signals $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ for a different actual values p_{scene} and θ_{scene} of scene were performed according Eq. (5) and Eq. (10), respectively. Stokes vector of scene polarization in Eqs. (5) and (10) considered in form:

$$\mathbf{S}_{scene} = \begin{bmatrix} I + \Delta I \\ (I + \Delta I) p_{scene} \cos(2 \cdot \theta_{scene}) \\ (I + \Delta I) p_{scene} \sin(2 \cdot \theta_{scene}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

where I is common intensity of scene (defined as unitary), and ΔI is random value that models an additive noise.

The values of introduced by the ScanPol and MSIP polarimeters imperfections (see Eq. (5), Eq. (10) and Eq. (41)) vary randomly within ranges of Eq. (40). Parameters of the input scene polarization p_{scene} and θ_{scene} vary within admissible ranges $p_{scene} \in [0; 1]$ and $\theta_{scene} \in [-90; 90]$.

The calculated values $R_{0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ}$ are used to retrieve degree and angle of the scene polarization as:

$$p_{ret} = \sqrt{q_{ret}^2 + u_{ret}^2}, \quad \theta_{ret} = \frac{1}{2} \arctan(u_{ret} / q_{ret}), \quad q_{ret} = \frac{R_{0^\circ} - R_{90^\circ}}{R_{0^\circ} + R_{90^\circ}}, \quad u_{ret} = \frac{R_{45^\circ} - R_{135^\circ}}{R_{45^\circ} + R_{135^\circ}}.$$

One of the obtained numerical results for the uncalibrated ScanPol polarimeter is shown in Fig. 9. In particular, in the Fig. 9a the dependence of Δp_{ret} error on the scene polarization parameters p_{scene} and θ_{scene} is shown. In Fig. 9b the dependence of $\Delta \theta_{ret}$ error on scenes' polarization parameters p_{scene} and θ_{scene} is shown.

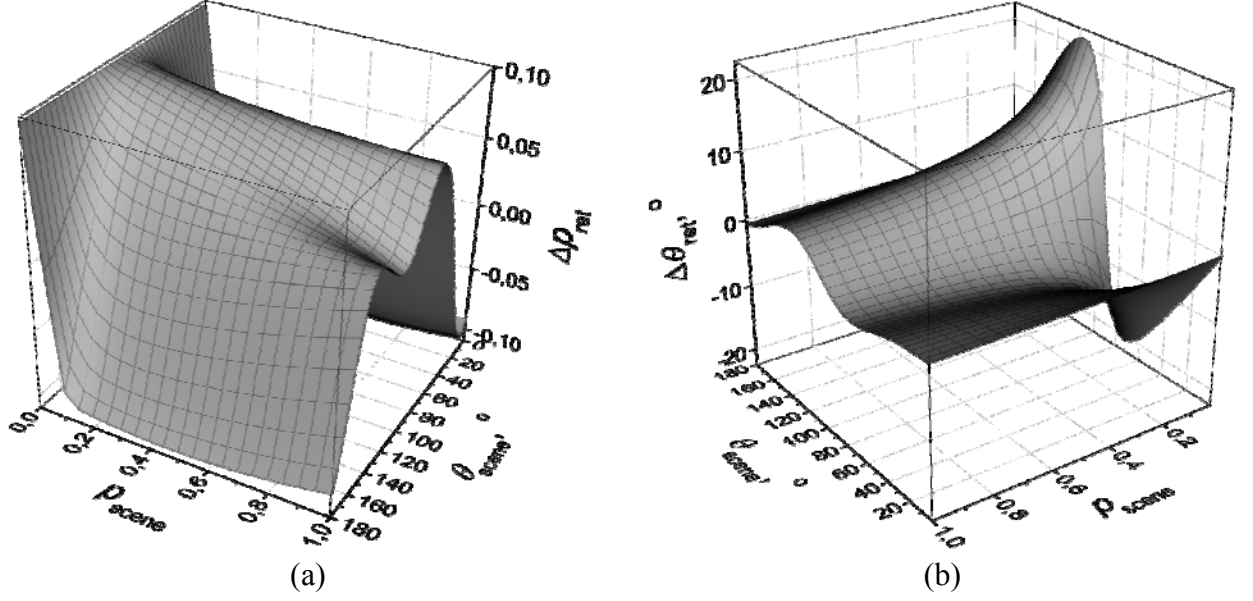


Fig. 9. Evaluation of the retrieved (a) DoLP error Δp_{ret} and (b) the AoLP error $\Delta \theta_{ret}$ dependent on DoLP and AoLP values of the input scene for the uncalibrated ScanPol polarimeter prototype.

Under conditions of Eq. (40) the errors in retrieving of the scene polarization may reach up to 10% for DoLP and up to 20 degrees for AoLP if the ScanPol polarimeter calibration procedure is ignored (see Fig. 9).

The shape of surfaces in Fig. 9 depends on the specific values of the ScanPol polarimeter imperfection. However, the error upper limits are stable on average. The smoothness of surfaces in Fig. 9 is explained by the negligible random intensity noise in comparison to the systematic error value due to other imperfection parameters in Eq. (40).

The uncalibrated MSIP polarimeter demonstrated the similar to Fig. 9 behavior of the DoLP and AoLP errors with the only difference in the error upper limits that were twice less than in the ScanPol polarimeter case ($\Delta p_{ret} \approx 5\%$ and $\Delta \theta_{ret} \approx 10$ degrees).

The next series of numerical experiments were carried out with the ScanPol and MSIP polarimeters, which are calibrated in accordance with Subsections 3.2, 3.3 and Subsection 4.2, respectively. The reference calibration polarizer has parameters: $e \leq 10^{-5}$, clocking offset $\varepsilon \approx 0.1^\circ$, and the test depolarizer ideal characteristics is assumed.

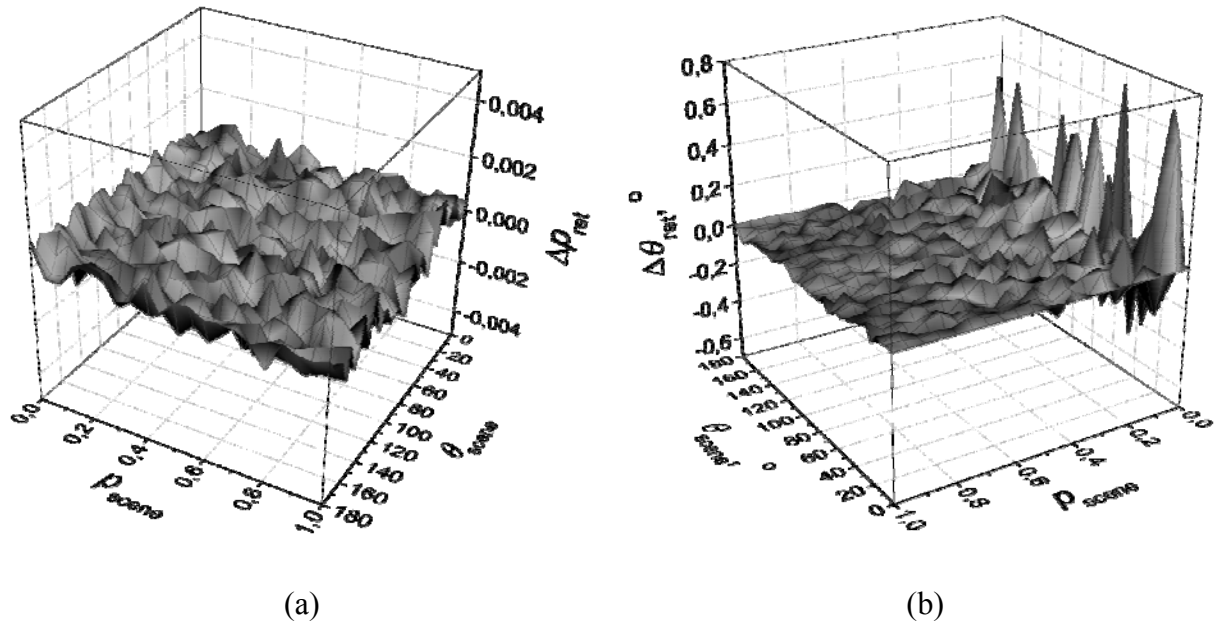


Fig. 10. The retrieved (a) DoLP error and (b) the AoLP error dependent on DoLP and AoLP values of the input scene for the calibrated ScanPol and MSIP polarimeters.

The experimental DoLP error and the AoLP error dependencies, obtained for calibrated ScanPol and MSIP polarimeters, are similar for both instruments. They are shown in Fig. 10 that demonstrates the effectiveness of the calibration procedures. These procedures can reduce the systematic errors in the way when the random additive noise becomes the primary source of errors Δp_{ret} and $\Delta \theta_{ret}$. The last one explains the roughness of surfaces in Fig. 10 as well as the similarity of errors dependencies for the calibrated ScanPol and MSIP polarimeters cases. In these cases, it is important to use high-quality reference polarisers and the polarizer rotation mounts. In addition, the experiment predicts an independence of the Δp_{ret} error on the p_{scene} and θ_{scene} variables. The $\Delta \theta_{ret}$ error is independent on θ_{scene} but depends on p_{scene} . The $\Delta \theta_{ret}$ value grows asymptotically when p_{scene} tends to the zero value, conditioned by indefiniteness in polarization angle for unpolarized light (see averaged dependence in Fig. 11).

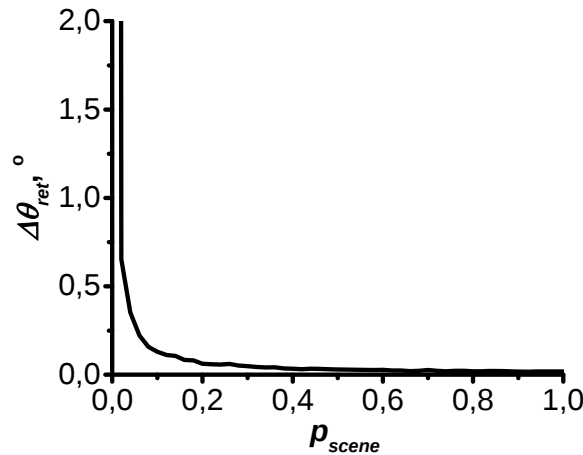


Fig. 11. An averaged dependence of the retrieved AoLP error $\Delta \theta_{ret}$ on the DoLP absolute value of the input scene for the ScanPol and MSIP polarimeters validation.

Finally, the experiments demonstrated that the calibration procedures for both polarimeters, by fulfillment of condition of Eq. (40), in average provides the DoLP error $\Delta p_{ret} \approx 0.08\%$ (to 0.15% required), since the AoLP error $\Delta \theta_{ret}$ is not exceed 0.2 degrees for $p_{scene} > 0.2$ (see Fig. 11).

Note that the polarimetric calibration validation for MSIP polarimeter was made in single pixel approximation. The last one does not consider the images mismatches in specific pixels, geometrical and spatial imperfections of optics and other distortions, which are usual for the imaging systems, and which can reduce the accuracy of the polarimetric measurements made by the MSIP imaging polarimeter significantly. Therefore, the expected MSIP polarimeter DoLP measurements accuracy is $\Delta p_{ret} \leq 0.5\%$ and the AoLP measurements accuracy is $\Delta \theta_{ret} \leq 1^\circ$, which includes polarimetric calibration validation results.

7. Discussion and conclusions

The space mission Aerosol-UA instrument calibration methods and procedures are discussed. The polarimetric models are developed and described using self-consistent Mueller-Stokes formalism (Chipman et al., 2018) for the ScanPol scanning polarimeter and the MSIP multi-spectral imaging polarimeter. The models describe the transformation of polarization and intensity of light propagating in the ScanPol and MSIP polarimeters with polarization imperfect optics.

Basing on the developed models, the corresponding calibration procedures were proposed. The calibration procedures allow compensating the zero bias of polarimeter channels, the channel gain difference, orientation offsets and finite extinction ratio of the polarizers, birefringence inserted by telescopes and additional instrumental polarizations produced by mismatches in the scan mirrors of the ScanPol polarimeter.

The Aerosol-UA mission instruments concept is similar to the CrossFire experiment (see <http://ddl.escience.cn/f/P3ui>) composed of Directional Polarization Camera (DPC), which is the POLDER type imager (Li, et al., 2018), and Particulate Observing Scanning Polarimeter (POSP), which is the APS type scanning polarimeter (Mishchenko et al., 2007). The expected accuracy of the DoLP and the AoLP measurements of the ScanPol and the POSP polarimeters are comparable since both scanners are similar to APS/Glory instrument. However, their scanning directions are orthogonal. The ScanPol polarimeter allows observing the multiangle scattering along track similar to APS/Glory concept, and the POSP polarimeter provides the cross-track scanning. Obviously, the data from both instruments can effectively complement each other since they are not duplicated being launched in orbit similar to the A-Train constellation (L'Ecuyer and Jiang 2010). In practice that would increase the reliability of the estimates of the aerosols parameters.

The DPC imaging instrument, which is single imaging sensor with a revolver switching analyzers with 0° , 60° , and 120° degrees polarization for each spectral filter, provides the time sequential measurement concept. The DPC polarization angles are optimal for minimizing the random errors. Using the single imaging sensor make it easier to customize and easier to combine the pixels in the images. However, this approach is slow, which produce blurring of the image especially when the observed spectral range is changed. In comparison to the DPC polarimeter, the MSIP imaging polarimeter is original, multichannel and therefore provides simultaneous observations in the all-spectral bandwidth and the all polarization directions. In the MSIP polarimeter, the use of the sensors optimized in sensitivity for each wavelength improves accuracy.

These MSIP polarimeter features should provide better polarimetric accuracy of $< 1\%$ than the DPC polarimeter of $< 2\%$. The calibration of the MSIP polarimeter using simultaneous ScanPol data improves the polarimetric accuracy of the MSIP. The CrossFire experiment concept can also provide the DPC and the POSP polarimeters intercalibration.

The ScanPol polarimeter calibration on orbit will serve to control the polarization and radiometric measurement quality. The data corrections will be made using the reference calibration measurements (see Eq. (20) – (22)) in the assumption that the polarization characteristics of reference units are more stable than polarization characteristics of the ScanPol polarimeter optics. The ScanPol optics will experience the degradation or/and the contamination during the mission orbital period and the measurement quality may be reduced. The validation experiments of the calibration procedure show the ScanPol polarimeter DoLP error $< 0.08\%$ with required $< 0.15\%$, and the AoLP error < 0.2 degrees.

The MSIP polarimeter calibration procedure is simpler in theory, in comparison to the ScanPol calibration, because the MSIP polarimeter does not include the scan mirrors, which introduce the additional instrumental polarization. In practice, we understand that the lower extinction ratio of the polarizing films, inhomogeneity and lower durability (in comparison with prism polarizers) of the polarizing films, the images mismatches in specific pixels, geometrical and spatial imperfections of optics and many other distortions, which are usual for the imaging systems, will significantly reduce accuracy of the polarimetric measurements. Therefore, the MSIP polarimeter will provide the DoLP measurements within accuracy $\Delta p_{ret} \leq 0.5\%$ and the AoLP measurements within accuracy $\Delta \theta_{ret} \leq 1^\circ$. The possible degradation of the MSIP polarimeter optics during the mission period on the orbit should be partially compensated by the intercalibration procedure using the ScanPol polarimeter data. It is expected that degradation processes in the MSIP polarimeter optics will have the homogeneous spatial distribution. Therefore, the corrections, which will be applied to the MSIP polarimeter data using the corresponded ScanPol measurements, can be used for all the imaging sensor pixels.

Conflict of Interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Author contributions

GM coordinated and led the efforts for this manuscript. YO and IK developed and described modelling with input from IS, GM, AB and IF. YO and GM wrote the paper with input from all authors.

Acknowledgements

This work was supported in part by the Special Complex Program for Space Research 2012–2017 and 2018–2022 of the National Academy of Sciences of Ukraine, by Taras Shevchenko National University of Kyiv, project 16BF051-02, by the International Center of Future Science, Jilin University, China. The authors extend special thanks to Michael Mishchenko and Mikhail Sosonkin for the support of the work and discussions the topic of this paper.

References

- Bréon, F.-M., Boucher, O., Lifermann, A., Morcrette, J.-J., Peuch, V.-H., Phulpin, T., Riedi, J., Stammes, P., Tanre, D., and Thepaut, J.-N. The 3MI mission for operational monitoring of aerosols from EPS-SG, CNES Report (2011) 56 p.
- Cairns, B., and Geogdzhayev, I. (2010). GSFC 421.7-70-03 Aerosol Polarimetry Sensor Algorithm Theoretic Basis Document. 2010.
http://glory.giss.nasa.gov/aps/docs/APS_ATBD_CALIBRATE_CCB.pdf
- Cairns, B., Russell, E. E., and Travis, L. D. Research Scanning Polarimeter: calibration and ground-based measurements. (1999). *Proc. SPIE 3754*, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II. doi: 10.1117/12.366329
- Chipman, R. A., Lam, W. S. T., Young, G. Polarized Light and Optical Systems. 2018. CRC Press, Taylor & Francis Group. Series: Optical Sciences and Applications of Light. 982 p. ISBN 9781498700566
- Diner, D.J., Davis, A., Hancock, B., Gutt, G., Chipman, R.A., and Cairns B. Dual photoelastic modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing. (2007). *Appl. Optics* 46 8428–8445.
- Fougnie, B., Marbach, Th., Lacan, A., Lang, R., Schlüssel, P., Poli, G., Munro, R., Couto, A.B. The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager – Overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization. (2018). *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 219, 23-32. doi:10.1016/j.jqsrt.2018.07.008
- L'Ecuyer, T.S., Jiang, J.H. (2010). Touring the atmosphere aboard the A-Train. *Physics Today*. 63(7), 36–41. doi:10.1063/1.3463626.
- Li, Z., Hou, W., Hong, J., Zheng, F., Luo, D., Wang, J., Gu, X., Qiao, Y. (2018). Directional Polarimetric Camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 218, 21–37. doi:10.1016/j.jqsrt.2018.07.003.
- Milnevsky, G., Yatskiv, Ya., Degtyaryov, O., Syniavskiy, I., Ivanov, Yu., Bovchaliuk, A., Mishchenko, M., Danylevsky, V., Sosonkin, M., and Bovchaliuk, V. (2015). Remote sensing of aerosol in the terrestrial atmosphere from space: new missions. *Adv. Astron. Space Phys.* 5(1), 11–16. doi: 10.17721/2227-1481.5.11-16
- Milnevsky, G., Yatskiv, Ya., Degtyaryov, O., Syniavskiy, I., Mishchenko, M., Rosenbush, V., Ivanov, Yu., Makarov, A., Bovchaliuk, A., Danylevsky, V., Sosonkin, M., Moskalov, S., Bovchaliuk, V., Lukenyuk, A., Shymkiv, A., and Udodov, E. (2016). New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*. 123, 292–300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.02.027>
- Mishchenko, M. I., and Travis, L. D. (1997). Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using measurements of reflected sunlight: effect of instrumental errors and aerosol absorption. *J. Geophys. Res.* 102, 13543–13553. <https://doi.org/10.1029/97JD01124>
- Mishchenko, M. I., Cairns, B., Kopp, G., Schueler, C. F., Fafaul, B.A., Hansen, J. E., Hooker, R. J., Itchkawich, T., Maring, H. B., and Travis, L. D. (2007). Accurate monitoring of terrestrial aerosol and total solar irradiance: Introducing the GLORY mission. *B. Am. Meteorol. Soc.* 80, 2229–2259. doi:10.1175/BAMS-88-5-677
- Mishchenko, M. I., Cairns, B., Hansen, J. E., Travis, L. D., Burg, R., Kaufman, Y. J., Vanderlei Martins, J., and Shettle, E. P. Monitoring of aerosol forcing of climate from space: analysis of

- measurement requirements. (2004). *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 88, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.03.030>
- Peralta, R. J., Nardell, C., Cairns, B., Russell, E. E., Travis, L. D., Mishchenko, M. I., Fafaul, B. A., Hooker, R. J. Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission. (2007). *Proc. SPIE 6786*, MIPPR 2007: Automatic Target Recognition and Image Analysis; and Multispectral Image Acquisition, 67865L 2007.doi: 10.1117/12.783307
- Sinyavskii, I., Ivanov, Yu., Vidmachenko, A. Concept of the construction of the optical setup of a panoramic Stokes polarimeter for small telescopes. (2013). *Journal of Optical Technology.* 80(9), 545–548.<https://doi.org/10.1364/JOT.80.000545>
- Starr, D. NASA's Aerosol-Cloud-Ecosystems (ACE) Mission, in Imaging and Applied Optics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper HMA4. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=HISE-2011-HMA4>
- van Harten, G., Snik, F., Rietjens, J.H.H., Smit, J.M., de Boer, J., Diamantopoulou, R., Hasekamp, O.P., Stam, D.M., Keller, C.U., Laan, E.C., Verlaan, A.L., Vliegthart, W.A., ter Horst, R., Navarro, R., Wielinga, K., Hannemann, S., Moon, S.G., and Voors, R. Prototyping for the Spectropolarimeter for Planetary EXploration (SPEX): calibration and sky measurements, in: SPIE Conf. Series 8160, (2011) 81600Z-1–81600Z-12, doi:10.1117/12.893741.
- Waquet, F., Cairns, B., Knobelspiesse K., Chowdhary, J., Travis, L.D., Schmid, B., and Mishchenko M. I. Polarimetric remote sensing of aerosols over land. (2009). *J. Geophys. Res.*, 114, D01206, doi:10.1029/2008JD010619.

Figure captions

Fig. 1. Scanning geometry in Aerosol-UA mission. Intersection of the ScanPol and MSIP polarimeters fields-of-view. Dotted line is satellite orbit, 19–8.5–6–8.5–46 km are the ScanPol polarimeter FOV lengths along track, the grey square is the MSIP polarimeter FOV.

Fig. 2. ScanPol polarimeter optical layout: (1) polarization compensated scan mirrors assembly; (2) input lens and collimator of the NUV–VIS spectral channel; (3) input lens and collimator of the NIR spectral channel, (4) Wollaston prisms; (5) dichroic mirrors; (6) camera lens and interference filters for spectral channels; (7) the NUV–VIS and SWIR sensors; (8) quartz wedge depolarizers; (9) Glan prisms polarizer; (10) black body.

Fig. 3. Optical layout concept for the MSIP imaging polarimeter: the light path in five optical units and field-of-view of the MSIP polarimeter: the three polarimetric optical units with white arrows, which show polarization directions of polarizer film 0° , 90° , 45° , 135° , and the two intensity optical units are shown.

Fig. 4. Equivalent polarization scheme of the ScanPol polarimeter single spectral channel: scan mirrors M1 and M2, telescopes T1 and T2, Wollaston prisms W1 and W2, intensity signals R_{0° , R_{90° , R_{45° and R_{135° , which are initial data for Stokes parameters calculation.

Fig. 5. The scan mirrors and calibration units layout of the ScanPol instrument: red segment is scan mirrors with rotation direction shown; blue element is quartz wedges of the depolarization unit seen at β_{dep} angle; green element is the Glan prism polarizer unit seen at β_{pol} angle, black element is the dark unit seen between β_0 and β_i angles; solar calibration unit seen at β_s angle. Scanning along-track directions between scan angle $\beta_{m1} = +50^\circ$ and $\beta_{m2} = -60^\circ$ from nadir (β_{nadir}).

Fig. 6. The one optical polarimetric unit layout of the MSIP polarimeter. Letter A shows view to input window with four film sector polarizers: collimator (1), field-of-view aperture (2), collimator (3), the polarizing element composited from polarizing films (4), spectral band filter (5), prisms for separation the input image to four images (6), camera lens (7), and the image sensor (8).

Fig. 7. The main elements of the one spectral polarisation unit of the MSIP polarimeter. Image separation system (at top left): (1) the base of separation unit, and (2–4) achromatic wedges for image separation into four images with different polarisations. Set of four images (at top right) with the position of polarizing element 0° , 90° , 45° and 135° in the areas A1, A2, A3, and A4 at the image sensor. Four real Moon images are shown in the four polarization angles as an example.

Fig. 8. The ScanPol and MSIP polarimeters combined in the single unit adapted to the YuzhSat microsatellite platform: (1) scan mirrors assembly, (2) ScanPol unit, (3) polarizer calibration unit, (4) photometric calibration unit, (5) dark unit (black body), (6) depolarizer calibration unit, (7–9) MSIP polarimetric units, (10–11) MSIP intensity units, and (12–13) interface units.

Fig. 9. Evaluation of the retrieved (a) DoLP error Δp_{ret} and (b) the AoLP error $\Delta \theta_{\text{ret}}$ dependent on DoLP and AoLP values of the input scene for the uncalibrated ScanPol polarimeter prototype.

Fig. 10. The retrieved (a) DoLP error and (b) the AoLP error dependent on DoLP and AoLP values of the input scene for the calibrated ScanPol and MSIP polarimeters.

Fig. 11. An averaged dependence of the retrieved AoLP error $\Delta \theta_{\text{ret}}$ on the DoLP absolute value of the input scene for the ScanPol and MSIP polarimeters validation.

Додаток Б. КОД ПРОГРАМИ КАЛІБРУВАЛЬНОГО МОДУЛЯ

```
from math import sin, cos, atan
```

```
class Calibration:
```

```
    eps = {1: 3, 2: 3}
```

```
    e = {1: 8, 2: 8}
```

```
    q_inst = 0.2
```

```
    u_inst = 0.1
```

```
    q_cal = 2**0.5 / 2
```

```
    u_cal = 2**0.5 / 2
```

```
    beta_nadir = 0
```

```
    def __init__(self):
```

```
        self.R = {}
```

```
        self.D = {}
```

```
        self.params_dict = {'q': 0,
```

```
                             'u': 0,
```

```
                             'DoLP': 0,
```

```
                             'AoLP': 0}
```

```
        self.RD = {}
```

```
        self.c = {}
```

```
        self.s = {}
```

```
        self.delta_I = {}
```

```
        self.K = {}
```

```
        self.a = {}
```

```
        self.is_first = True
```

```
    def make_calibration(self, R, D_list):
```

```
        self.R = R
```

```
        self.calculate_mean_dark(D_list)
```

```
        self.calc_radiometric_A()
```

```
        self.calculate_parameters()
```

```
        self.update_parameters()
```

```
        self.calculate_stokes_parameters()
```

```
        self.params_dict['DoLP'] = (self.params_dict['q']**2 + self.params_dict['u']**2)**0.5
```

```
        self.params_dict['AoLP'] = atan(self.params_dict['u'] / self.params_dict['q']) / 2 - 90 +
```

```
self.beta_nadi
```

```
    def calculate_mean_dark(self, D_list):
```

```
        for key in D_list:
```

```

        self.D[key] = sum(D_list[key]) / (len(D_list[key]))

def calc_radiometric_A(self):
    pass

def calculate_parameters(self):
    self.calc_RD()
    self.calc_c_and_s()

    if self.is_first:
        self.calc_K()
        self.calc_a()
        self.is_first = False

    self.calc_delta_I()

def update_parameters(self):
    self.update_K()
    self.update_a()

def calc_a(self):
    self.a['q'] = (1 + self.e[1]) / (1 - self.e[1])
    self.a['u'] = (1 + self.e[2]) / (1 - self.e[2])

def update_a(self):
    q_cal_ = - self.q_cal * cos(2 * self.eps[1]) - self.u_cal * sin(2 * self.eps[1])
    u_cal_ = self.q_cal * sin(2 * self.eps[2]) - self.u_cal * cos(2 * self.eps[2])
    q_inst_ = self.q_inst * cos(2 * self.eps[1]) + self.u_inst * sin(2 * self.eps[1])
    u_inst_ = - self.q_inst * sin(2 * self.eps[2]) + self.u_inst * cos(2 * self.eps[2])

    common_part = (1 + self.q_cal * self.q_inst + self.u_cal * self.u_inst)
    q_numerator = (q_cal_ + q_inst_)
    u_numerator = (u_cal_ + u_inst_)
    q_ratio = (self.RD['0'] - self.K[1] * self.RD['90']) / (self.RD['0'] + self.K[1] * self.RD['90'])
    u_ratio = (self.RD['45'] - self.K[2] * self.RD['135']) / (self.RD['45'] + self.K[2] * self.RD['135'])

    self.a['q'] = q_numerator / q_ratio / common_part
    self.a['u'] = u_numerator / u_ratio / common_part

def update_K(self):
    q_inst_ = self.q_inst * cos(2 * self.eps[1]) + self.u_inst * sin(2 * self.eps[1])
    u_inst_ = - self.q_inst * sin(2 * self.eps[2]) + self.u_inst * cos(2 * self.eps[2])

    self.K[1] = (1 - self.a['q'] * q_inst_) / (1 + self.a['q'] * q_inst_) * self.RD['0'] / self.RD['90']

```

```

self.K[2] = (1 - self.a['u'] * u_inst_) / (1 + self.a['u'] * u_inst_) * self.RD['45'] / self.RD['135']

def calc_RD(self):
    for key in self.R:
        self.RD[key] = self.R[key] - self.D[key]

def calc_c_and_s(self):
    self.s[1] = sin(self.eps[1])
    self.s[2] = sin(self.eps[2])
    self.c[1] = cos(self.eps[1])
    self.c[2] = cos(self.eps[2])

def calc_K(self):
    self.K[1] = self.RD['0'] / self.RD['90']
    self.K[2] = self.RD['45'] / self.RD['135']

def calc_delta_I(self):
    self.delta_I['0,90'] = (self.RD['0'] - self.K[1] * self.RD['90']) / (self.RD['0'] + self.K[1] *
self.RD['90']) * self.a['q']
    self.delta_I['45,135'] = (self.RD['45'] - self.K[2] * self.RD['135']) / (self.RD['45'] + self.K[2] *
self.RD['135']) * self.a['u']

def get_main_numerator_q(self):
    part_1 = self.q_inst * self.s[2] * (self.s[1] + self.u_inst * self.delta_I['0,90'])
    part_2 = - (1 + self.u_inst ** 2) * (self.c[2] * self.delta_I['0,90'] - self.s[1] *
self.delta_I['45,135'])
    part_3 = self.c[1] * self.q_inst * (self.c[2] + self.u_inst * self.delta_I['45,135'])
    return part_1 + part_2 + part_3

def get_main_numerator_u(self):
    part_1 = self.c[1] * self.c[2] * self.u_inst
    part_2 = - (self.s[2] + self.q_inst**2 * self.s[2] - self.c[2] * self.q_inst * self.u_inst) *
self.delta_I['0,90']
    part_3 = - self.c[1] * (1 + self.q_inst**2) * self.delta_I['45,135']
    part_4 = self.s[1] * self.u_inst * (self.s[2] - self.q_inst * self.delta_I['45,135'])
    return part_1 + part_2 + part_3 + part_4

def get_main_denominator(self):
    part_1 = self.s[1] * self.s[2]
    part_2 = self.c[2] * self.q_inst * self.delta_I['0,90']
    part_3 = self.s[2] * self.u_inst * self.delta_I['0,90']
    part_4 = - self.q_inst * self.s[1] * self.delta_I['45,135']
    part_5 = self.c[1] * (self.c[2] + self.u_inst * self.delta_I['45,135'])

```

```
return part_1 + part_2 + part_3 + part_4 + part_5
```

```
def calculate_stokes_parameters(self):
```

```
    self.params_dict['q'] = self.get_main_numerator_q() / self.get_main_denominator()
```

```
    self.params_dict['u'] = self.get_main_numerator_u() / self.get_main_denominator()
```

```
obj = Calibration()
```

```
# test values
```

```
R = {'0': 1000,
```

```
     '45': 5000,
```

```
     '90': 7300,
```

```
     '135': 1800}
```

```
# test values
```

```
D_list = {'0': [3,4,5],
```

```
          '45': [4,5,6],
```

```
          '90': [6,7,8],
```

```
          '135': [5,6,7]}
```

```
obj.make_calibration(R, D_list)
```

Додаток В. ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ДОГОВОРОМ

Статті в реферованих виданнях (5):

Milinevsky G., Danylevsky V. Atmospheric aerosol over Ukraine region: current status of knowledge and research. 2018. *Frontiers in Environmental Science. Environmental Informatics*, doi:10.3389/fenvs.2018.00059

Evtushevsky O., Grytsai A., Milinevsky G., Decadal changes in the central tropical Pacific teleconnection to the Southern Hemisphere extratropics. *Climate Dynamics*, 2018. doi: 10.1007/s00382-018-4354-5.

Syniavskiy, I.I., Ivanov, Yu.S., Sosonkin, M.G., Milinevsky, G.P., Koshman, G. Multispectral imager-polarimeter of the "Aerosol-UA" space project. *Space Sci. & Technol.* 2018, 24(3), 23-32. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.023>

Grytsai, A.V., Milinevsky, G.P. Total ozone content over Kyiv-Goloseyev station by ground-based and satellite measurements in 2010–2015. *Space Sci. & Technol.* 2018, 24(3), 40-54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>

Bovchaliuk, V., Milinevsky, G., Danylevsky, V., Goloub, Ph., Sosonkin, M., Yukhimchuk, Yu., Podvin, T. Aerosol properties in atmosphere over Kyiv using lidar and sun-photometer observations. *Space Sci. & Technol.* 2017, 23(6), 34-45. <https://doi.org/10.15407/knit2017.06.034>